# استفاده از منبع تولید پراکنده انعطاف پذیر به منظور تامین توان شبکه ۲۵kV قطار برقی و بهبود معیارهای کیفیت توان در شبکه بالاسری

مرتضی عزتی[۱] ، کارشناس ارشد ، سید حسین حسینیان[۲]، استاد ، احسان آزاد فارسانی [۳]، دکترا

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
m.ezzati69@yahoo.com
۲ - دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
hosseinian@aut.ac.ir
۳- گروه برق-دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان – اصفهان- ایران
e.azad@gut.ac.ir

**چکیده: با توجه به مزایای انرژی‌های تجدیدپذیر موسوم به تولیدات پراکنده، بهره‌برداری از این منابع در شبکه‌های برق سرتاسر جهان رو به افزایش می‌باشد. در این مقاله سعی شده است تا از این منابع در کنار شبکه سراسری برق برای تامین توان مصرفی قطارهای برقی استفاده شود، اما به دلیل تکفاز بودن قطارهای برقی در شبکه ی AC با سطح ولتاژ ۲۵ کیلوولت و همچنین متغیر بودن میزان توان مصرفی آنها در طی زمان و مکان، مشکلات کیفیت توانی شدیدی را در شبکه سراسری برق ایجاد می‌نمایند لذا هدف از مقاله، علاوه بر تامین توان مورد نیاز قطارهای برقی، بهبود نامتعادلی، حذف هارمونیک های جریان از شبکه‌ی بالادست و همچنین دستیابی به ضریب توان تقریبا واحد از دید شبکه می باشد که این اهدف با پیاده‌سازی تئوری توان لحظه‌ای بر روی مبدل‌های کنترلی تولید پراکنده محقق گشته است.**

**واژه های کلیدی :** تامین توان،کاهش نامتعادلی ، بهبود کیفیت توان ، منبع تولید پراکنده انعطاف پذیر

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۱/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر سید حسین حسینیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی تکنیک تهران)،دانشکده مهندسی برق

[ Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.3.0 ]

## ۱- مقدمه

از آنجا که استفاده از حمل ونقل برقی، همچون راه آهن های برقی، متروها، تراموا‌ها، به دلیل مزایایی همچون بازدهی بالا، سهولت استفاده، خرابی کمتر قطعات، ثابت بودن میزان انرژی خروجی با تغییر شرایط محیطی، عدم آلودگی هوا در محیط زیست، در حال گسترش است. از این رو بررسی و تحلیل سیستم تغذیه قطارهای برقی حائز اهمیت است. این سیستم ها می توانند جایگزین و یا در کنار شبکه های سراسری برق به کار گرفته شوند. در [1] بواسطه فیولسل با دینامیک توسعه یافته، باطری و ابر خازن جهت تامین توان اکتیو یک تراموا استفاده کرده اند یا در [2] نیز به صورت هیبریدی از این منابع و با مدیریت انرژی آنها درجهت تامین توان مصرفی تراموا برآمده اند. از آنجا که قطارهای برقی در سیستم های ترکشن AC، به دلایل تکفاز بودن و تغییرات آنی توان کشیده شده از شبکه مشکلات شدید کیفیت توانی را بوجود خواهند آورد که تا کنون راه حل های بسیاری برای حذف این مشکلات ارائه شده است. روش جابجایی فاز به منظور کاربرد در سیستم های ترکشن مورد توسعه قرار گرفته اند که هر سه پست ترکشن مجاور به دو فاز مختلف شبکه ی بالادست متصل می گردند که به منظور جبران مولفه ی توالی منفی (NSC) هارمونیک اصلی استفاده می شود[3]. غالباً از ادواتی همچون جبرانگرهای استاتیک سنکرون (STATCOM)[4] ،جبرانگر های استاتیک توان راکتیو (SVC) [5,6,7] که به منظور جبرانسازی NSC جریان و توان راکتیو به کار گرفته می شوند، استفاده می گردند اما اخیراً بهبود دهنده ی توان استاتیک راه آهن (RPC)[8] ، بهبوددهنده ی کیفیت توان اکتیو (APQC) [9] و بهبوددهنده ی کیفیت توان هیبریدی (HPQC) [10,11] ، و مبدل های پشت به پشت تکفاز [12]علاوه بر جبرانسازی NSC جریان و توان راکتیو ، حذف هارمونیک ها را نیز به خوبی انجام خواهند داد. حال در این مقاله دو قطار با مدل ساده شده موتور القایی ۳ فاز درنظر گرفته می شود که یکی در مسیر رفت و دیگری در مسیر برگشت در حال حرکت اند. همچنین بار مدل کننده هر یک از این دو قطار توسط اینورتر پل H به لینک dc خروجی یکسوساز متصل به ترانس کاهنده ۲۵ kV/۱۲/۵kV بالاسر هر قطار تغذیه می شوند. که هر یک از این ترانس ها توسط فیدرهای مجزا به ترانس اصلی کاهنده ۶۳kV/۲۵kV که از نوع اسکات (اتصال سه فاز به دوفاز) است به شبکه اصلی متصل می شود. حال با توجه به تغذیه تکفاز هر قطار به طور مجزا و شرایط حرکت متفاوتی (شتابگیری، سرعت ثابت و ترمزی) که هر یک از قطارها به طور مستقل از هم می توانند داشته باشند. جریانی توسط این سیستم قطار کشیده می شود که به صورت نامتعادل می باشد. از این رو این جریان نامتعادل به شبکه اصلی راه پیدا می کند و مشکلات نامتعادلی و همچنین هارمونیکی را برای جریان به وجود می آورد. از آنجا که در هیچ یک از کارهای انجام شده ی مذکور به بحث همزمان تامین توان و کیفیت توان شبکه های ترکشن پرداخته نشده است، لذا در این مقاله توانسته شده است که اولاً از یک منبع تولید پراکنده انعطاف پذیر (FDG) به عنوان سیستم تغذیه قطارها استفاده شود و ثانیاً سیستم تغذیه پیشنهادی با استفاده از ساختار دو اینورتر به شبکه متصل گشته که اهداف زیر به صورت توأمان حاصل گردد :

- تامین توان اکتیو مورد نیاز یک قطار برقی در شبکه ی ترکشن AC با سطح ولتاژ ۲۵ کیلوولت
- بهبود عدم تعادل شبکه ی بالادست
- کاهش سطح THD در شبکه ی بالادست
- جبرانسازی توان راکتیو

## ۲- مطالعه اجزای اصلی سیستم تغذیه قطار

در این قسمت به مطالعه تمام اجزایی که در مدلسازی و شبیه سازی تغذیه قطار مد نظر قرار گرفته اند، و در شکل(۱) نشان داده شده اند پرداخته می شود.

### ۲-۱- مطالعه منبع تولید پراکنده انعطاف پذیر

در طول دهه‌ی اخیر، پیاده‌سازی تولیدات پراکنده در کنار شبکه‌های برق شدت گرفته‌است. این منابع، ابزار ضروری ای هستند که از جمله مزایای آن می‌توان به تاخیر در سرمایه‌گذاری نیروگاه‌ها و خطوط انتقال جدید، بهبود کیفیت توان و تعادل پخش بار، آلودگی کمتر محیط زیست، تولید همزمان برق و گرما، پیک سابی در ساعات اوج مصرف برق و بالابردن امنیت شبکه و نصب و راه‌اندازی سریع اشاره کرد.معمولاً، این منابع از طریق اینورترها به شبکه متصل می‌گردند و کارکرد اصلی اینورترها، تحویل توان اکتیو به شبکه می‌باشد و در ضریب قدرت واحد عمل می‌کنند اما برخی از سیستم ها به منظور تزریق یا جذب توان راکتیو نیز به کارگرفته خواهند شد. عدم تداوم تزریق توان سیستم های تولیدات پراکنده به شبکه و بار ، به دلیل عوامل زیادی همچون عدم دسترسی به منابع و ملاحظات قیمت و تقاضا می باشد [14]. تولید پراکنده ی مورد استفاده در این مطالعه، با توجه به شرایط زمان، موقعیت مکانی، وضعیت آب و هوا و سطح اقتصادی و تکنولوژی حاکم تعیین می گردد که می تواند هر یک از منابع سلول های خورشیدی، فیولسل، میکروتوربین ها و ... باشد که علاوه بر تزریق توان اکتیو به شبکه وبار قطار ، همانند عناصری چون فیلتر اکتیو توان(APF) [15] و یا جبرانگر سنکرون استاتیک توزیع یافته (DSTATCOM) [16,17] وظیفه ی تامین توان راکتیو بار، رفع نامتعادلی و کاهش هارمونیکی را برعهده دارد از این رو در مقاله حاضر با عنوان تولید پراکنده انعطاف پذیر (FDG) موسوم گشته است.

اهداف فوق توسط کنترل مولفه های جریان و توان دو اینورتر متصل کننده FDG به شبکه با استفاده از تئوری توان لحظه ای p-q در [13] قابل انجام است. نکته حائز اهمیت این است کلیدزنی به گونه ای



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.3.0 ]

است که با کنترل مولفه منفی جریان به بهبود نامتعادلی، و کلیدزنی اینورتر دیگر به منظور تامین مولفه های توان برای تامین توان مورد نیاز قطار و همچنین کاهش مولفه های هارمونیکی جریان شبکه انجام می پذیرد.

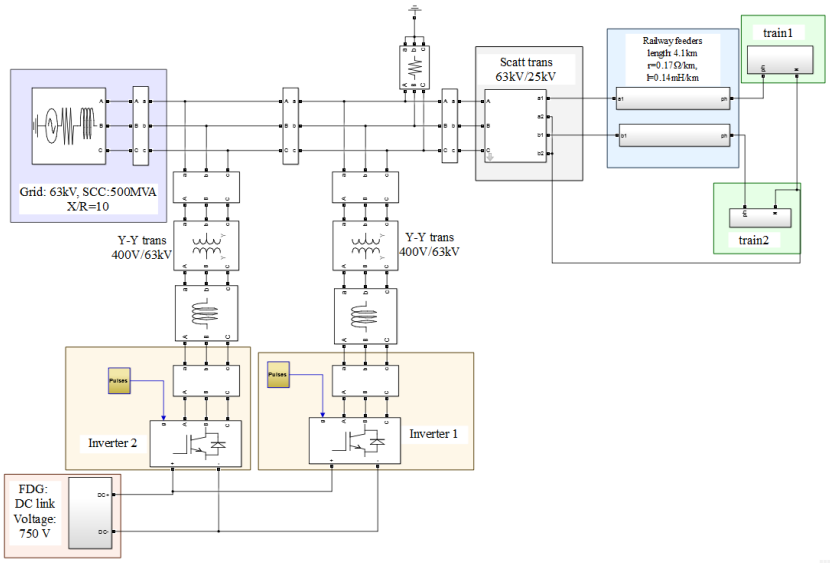
## ۲-۲- شبکه اصلی و ترانس کاهنده اصلی پست کشش

در مدلسازی انجام گرفته از شبکه ای با سطح ولتاژ موثر خط به خط ۶۳kV با قدرت اتصال کوتاه ۵۰۰ مگاولت آمپر و نسبت اتصال کوتاه X/R=10 استفاده شده است.

پست کشش جهت تامین دو مسیر تکفاز ۲۵ کیلوولت برای تغذیه قطارها، نیازمند ترانسی می باشد که چنین هدفی را محقق سازد. بدین

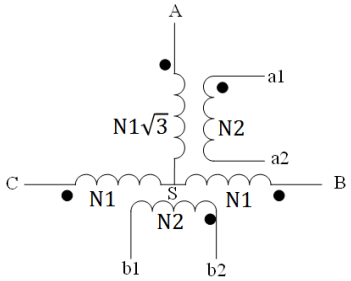
[ Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.3.0 ]




**شکل (۱): نمای سیستم تغذیه قطار توسط شبکه و تولید پراکنده انعطاف پذیر اتصال یافته توسط اینورتر دوبل**

منظور در این مقاله برای تغذیه تکفاز هر یک از قطارها از یک ترانس کاهنده اسکات تبدیل کننده سه فاز به دوفاز با نسبت ۶۳kV/۲۵kV استفاده می شود. شکل (۲) موقعیت سیم پیچ های اولیه و ثانویه در ترانس را نشان می دهد و روابط (۱-۳) مدل ریاضی استفاده شده برای این ترانس را بیان می کنند.




**شکل (۲): موقعیت الکتریکی سیم پیچ های اولیه و ثانویه ترانس اسکات**

$$V_{AS} = V_{AB}\cos\frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2}V_L \quad (1)$$

$$V_{a1a2} = \frac{N_2}{\sqrt{3}N_1}V_{AS} = \frac{N_2}{2N_1}V_L \quad (2)$$

$$V_{b1b2} = \frac{N_2}{2N_1}V_{BC} = \frac{N_2}{2N_1}V_L \quad (3)$$

## ۲-۳- فیدر یا هادی تماس تغذیه کننده قطار

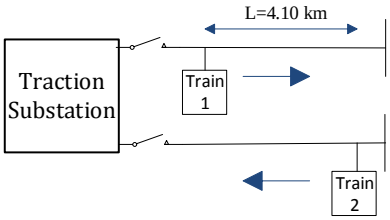
از آنجا که قطار ساکن نمی باشد و مسافتی را بین دو ایستگاه طی می‌نماید لذا امپدانس هادی تماس از پست کشش تا بار قطار، متناسب با سرعت آن تغییر می‌کند. همانطور که در شکل(۳) مشخص است قطار (۱) که از پست کشش دور می‌شود امپدانسش مطابق رابطه (۴) است.

$$(r + j\omega l) \times x_1(t) \quad (4)$$

و امپدانس قطار (۲) با رابطه (۵) بیان می شود:

$$(r + j\omega l) \times (L - x_2(t)) \quad (5)$$

که $r + j\omega l$، امپدانس در واحد طول (برای یک خط با طول کوتاه که در این مقاله طول خط ۴/۱ کیلومتر فرض شده است پس مدل کوتاه خط برقرار است چرا که طول خط بسیار کمتر از ۸۰ کیلومتر است)، $L$ مسافت بین آغاز و توقف حرکت قطار و $x_1(t)$ و $x_2(t)$ به ترتیب فاصله‌ی هر یک از قطارهای ۱ و ۲ از پست کشش می‌باشد که با زمان تغییرات غیرثابتی دارد.




**شکل (۳): موقعیت نسبی حرکت قطارها**



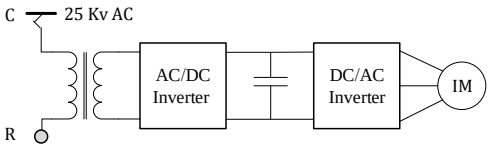
[ Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.3.0 ]

نکته قابل توجه این است که ترانس اسکات در خروجی، دو مسیر تکفاز ۲۵ کیلوولت به منظور تغذیه ی دو بار ترکشن فراهم می آورد که هر دو قطارهایی هستند که یکی در حال رفت و دیگری در حال برگشت می باشد.

## ۳- مدل بار قطار

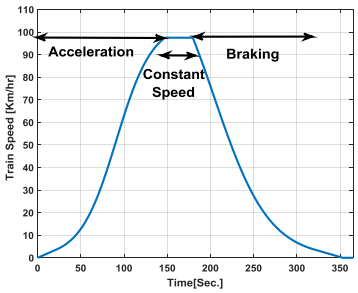
در مراجع متعددی [20-25] مدل لوکوموتیو مورد مطالعه قرار گرفته است. مدلی که از آن استفاده شده است مطابق شکل(۴) می‌باشد که شامل ۴واحد ترانسفورماتور، یکسوساز، اینورتر و موتور القایی می‌باشد که جریان هارمونیکی تولیدی به توان خروجی و عملکرد مدولاسیون یکسوکننده‌ها بستگی دارد [26] هنگامی‌که قطار در مد ترمزی قرار می‌گیرد عملکرد یکسوسازی به اینورتری و بالعکس تبدیل می‌گردد. یکسوساز مورد استفاده به صورت نیمه کنترل شده (نیمه تریستوری) و اینورتر به کار رفته مبدل پل H با ۶ کلید می باشد.



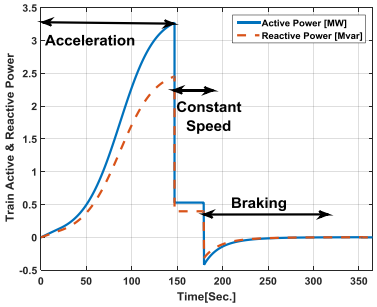

**شکل (۴): شماتیک کلی مدل بار قطار**

## ۴- تحلیل حرکت قطار

نمودار سرعت- زمان قطار مطابق شکل (۵) می‌باشد که در [18] مورد استفاده قرارگرفته‌است که این نمودار مربوط به طی فاصله‌ی میان دو ایستگاه مجاور می‌باشد. بنابر مرجع [19] ، نمودار حرکت را می‌توان به سه بخش شتابگیری، حرکت سرعت ثابت و ترمزی تقسیم کرد. قطار از ابتدای ایستگاه شروع به شتاب‌گرفتن می‌نماید و در انتهای حرکت شتابگیری به حداکثر سرعت در حدود ۹۵ کیلومتربرساعت می‌رسد که در طول این حرکت، حداکثر توان را دریافت می‌کند، شکل (۶)، سپس با سرعتی ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد و پس از طی مسافتی به ناحیه ی ترمزی وارد می‌شود که در این مدت توان از قطار به شبکه باز می‌گردد.




**شکل (۵): نمودار سرعت-زمان قطار [18]**




**شکل (۶): نمودار توان اکتیو و راکتیو در نظر گرفته شده برای مدل بار قطار[18]**

در اینجا به منظور بررسی حالات مختلف حرکت دو قطار جدولی مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده که مشتمل بر ۶ حالت است.

**جدول (۱): نمایش حالات مختلف حرکت دوقطار نسبت به هم**

| حالات | قطار (۱) | | | قطار (۲) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | شتابگیری | سرعت ثابت | ترمزی | شتابگیری | سرعت ثابت | ترمزی |
| ۱ | ✓ | | | ✓ | | |
| ۲ | | ✓ | | | ✓ | |
| ۳ | | | ✓ | | | ✓ |
| ۴ | ✓ | | | | ✓ | |
| ۵ | ✓ | | | | | ✓ |
| ۶ | | ✓ | | | | ✓ |

## ۵- توان دهی و جبرانسازی مشکلات کیفیت توان در شبکه تغذیه قطار توسط FDG

بارهای ترکشن راه آهن های AC به دلایل بهره برداری از ادوات الکترونیک قدرت، تغییرپذیری لحظه ای میزان توان مصرفی آنها و همچنین تکفاز بودن آنها، مشکلات شدیدی را بر سیستم های مجاور خود ایجاد خواهند کرد که از جمله مهمترین این مسائل، ایجاد نامتعادلی، تولید هارمونیک و تخریب ضریب قدرت در شبکه بالاسری خواهد بود که در این مقاله سعی شده به این مشکلات و حل آنها پرداخته شود. گرچه مشکلات دیگری همچون اثرات نامطلوب بر روی سیستم های سیگنالینگ و مخابرات، کاهش ضریب بهره، اشکال در کار سیستم های حفاظتی و عملکرد نادرست سیستم های کنترلی خط انتقال نیز ایجاد خواهد شد. جدی ترین مشکل در کیفیت توان سیستم های راه آهن برقی ایجاد نامتعادلی می باشد به دلیل آنکه غالب قطارها تکفاز



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.3.0 ]

می باشند که می توانند مولفه ی توالی منفی(NSC) جریان به اندازه ی مولفه ی توالی مثبت (PSC)تولیدکنند[28].

سیستم های ترکشن DC به دلیل استفاده ی از یکسوسازهای ۱۲ پالسه، هارمونیک های ۱۱ و ۱۳ قابل توجهی تولید خواهند کرد و سیستم های ترکشن AC نیز به سبب داشتن مبدل های AC/DC/AC هارمونیک های متنوعی را به شبکه ی سه فاز تزریق می کنند که می بایست جبران گردند [27].

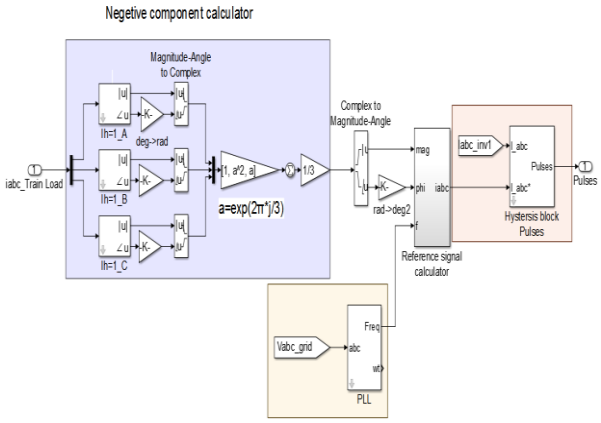
علاوه بر مشکلات عدم تعادل و تولید هارمونیک، لازم بـه ذکـر است که به دلیل داشـتن خاصـیت سـلفی موتورهـای القـایی بـه کاررفته در لوکوموتیـو در حالـت شـتابگیری قطـار، تـوان راکتیـو مصرف می کنند و در حالت ترمزی نیز توان راکتیو به سوی شبکه می فرستند که در این مطالعه فرض کرده ایم بار قطار در هرلحظه در ضریب قدرت ۰.۸ پسفاز کار کند.

در این قسمت از تئوری توان لحظه ای [13] به منظور کنترل مبدل دوبل متصل به FDG به گونه ای استفاده خواهد شد که علاوه بر تامین توان مصرفی قطار ، جریان نامتعادل و دارای THD بالای شبکه ۶۳ kv، به وضعیت مناسب، که دارای مشخصه نامتعادلی کم و سطح هارمونیکی پایین است، حاصل شود، ظرفیت هر یک از دو مبدل به میزان مجموع حداکثر توانی که هر یک از قطارها خواهند کشید انتخاب شده است.

## ۵-۱- جبرانسازی نامتعادلی

از اینورتر شماره (۱) به منظور متعادل کردن جریان شبکه استفاده می شود. برای کنترل این مبدل از روش کلیدزنی هیسترزیس که اساس آن مقایسه جریان های اندازه گیری شده و جریان های مرجع می باشد، انجام می گیرد. بدین ترتیب که جریان از پایانه فشارقوی اینورتر۱ اندازه گیری شده و با مقایسه آن با جریان مرجع توسط باند پایین و بالای هیسترزیس کلیدزنی صورت خواهد گرفت.

به منظور تعیین جریان های سه فاز مرجع به منظور کلیدزنی اینورتر۱ از مولفه منفی جریان بار قطار استفاده می شود. بدین صورت که توسط بلوکی ابتدا مولفه منفی جریان بار برای هارمونیک اول محاسبه می شود دامنه این مولفه به عنوان دامنه جریان های مرجع کلیدزنی و فاز آن نیز به عنوان فاز اولیه جریان های مرجع در نظر گرفته می شود.. به منظور تعیین فرکانس آن از یک PLL که در اصل فرکانس ولتاژ شبکه را هر لحظه محاسبه می کند استفاده کرده و معادل فرکانس جریان مرجع در نظرگرفته شده است. شکل (۱۰) بیانگر دیاگرام کنترل اینورتر (۱)، به منظور جبرانسازی نامتعادلی جریان شبکه است.




**شکل (۱۰): مدل کنترل اینورتر (۱) به منظور متعادل کردن جریان شبکه**

## ۵-۲- کنترل توان و بهبود THD جریان

وظیفه کنترل توان اصلی بار قطار و بهبود THD جریان بر عهده اینورتر (۲) می باشد بدین منظور از تئوری توان لحظه ای [13] برای کنترل این مبدل بهره در قاب $d-q$ بیان می شوند. در ابتدا باید گفت جریان اینورتر (۲) ، معادل مجموع جریان های بار قطار، جریان شبکه و جریان تزریقی اینورتر(۱) می باشد. شکل (۱) این موضوع را به خوبی نشان می دهد. از این رو جریانی که اینورتر (۲) به دنبال بهبود آن است، یک جریان تقریبا متعادل است و مشکل نامتعادلی برای این اینورتر وجود نخواهد داشت. چرا که اینورتر (۱) این معضل را برطرف کرده بود. رابطه (۱۰) بیانگر جریانی است که اینورتر (۲) باید به طرف شبکه و بار تزریق نماید.

$$I_{inv2} = I_{train\ load} + I_{inv1} + I_{grid} \qquad (10)$$

در این جا باید گفت هر توانی از جمله توانی که باید اینورتر (۲) تزریق نماید از ۴ مولفه اکتیو متوسط، راکتیو متوسط، اکتیو نوسانی و راکتیو نوسانی تشکیل شده است. روابط(۱۱) و (۱۲) این مولفه های توان را نشان می دهند.

$$P = \bar{P} + \tilde{P} \qquad (11)$$

$$Q = \bar{Q} + \tilde{Q} \qquad (12)$$

که نماد- و ~ در هر یک از توان ها به ترتیب بیانگر مقدار متوسط و مقدار نوسانی آن کمیت است.

با کنتـرل ایـن مولفـه هـا مـی تـوان بـه کنتـرل تـوان و کـاهش THDجریان پرداخت. همانند اینورتر (۱) به منظور کلیدزنی ایـن اینورتر از بلوک هیسترزیس استفاده شده است که این بلوک برای تعیین پالس های کلید از مقایسه بین جریان سه فاز اندازه گیـری



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.3.0 ]

شده ترمینال خروجی اینورتر (۲) در سمت قشارقوی یا همان kV ۶۳ و جریان سه فاز مرجع اینورتر(۲) بهره می برد. در این اینورتر نیز به منظور کنترل کامل باید سیگنال های مرجع یا جریان های مرجع را تعیین نمود. برای تعیین این سیگنال ها مرجع از تئوری توان لحظه ای استفاده می شود. ابتدا فرض می شود که اینورتر(۲) یک توان اکتیو متوسط مستقل از توان بار قطار است به سمت قطار و شبکه تزریق می نماید. که این توان به گونه ای تعیین می شود، که هم توان اکتیو بار قطار را تامین و هم مقدار اضافی آن به سمت شبکه تزریق شود. این توان را به عنوان توان اکتیو متوسط مرجع برای اینورتر (۲) فرض می شود.

اما برای تعیین مقدار مرجع توان راکتیو متوسط باید معیار بهبود ضریب توان دیده شده از سمت شبکه را معیار قرار داد. پس برای آنکه بتوان ضریب توان دیده شده از سمت شبکه را نزدیک واحد قرار داد صرفا کافی است تمام توان راکتیو متوسط مورد نیاز که از طرف بار درخواست می شود FDG از طریق اینورتر (۲) تزریق نماید باید توجه نمود، چون هدف بهبود ضریب توان است پس توان اضافی راکتیو متوسط نباید از طریق FDG تزریق شود. رابطه (۱۳) بیانگر مقدار مرجع توان راکتیو متوسطی است که از طرف اینورتر (۲) باید تزریق شود

$$\bar{Q}_{ref} = \bar{Q}_{train\ laod} + \bar{Q}_{inv1} \quad (13)$$

حال در ادامه می توان با هدف کاهش هارمونیک های جریان و یا کاهش THD این کمیت به تعیین مقادیر مرجع توان های اکتیو نوسانی و راکتیو نوسانی که اینورتر (۲) باید تزریق نماید، پرداخت. بدین منظور ابتدا باید مولفه های d,q جریان بار و ولتاژ شبکه را از روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه کرد.

$$[I_{Ldqo}] = [T_{dqo}][I_{Labc}] \quad (14)$$
$$[V_{dqo}] = [T_{dqo}][V_{abc}] \quad (15)$$

که $I_{Ldqo}$ و $I_{Labc}$ به ترتیب مجموع جریان های بار قطار و اینورتر(۱) در قاب dqo و abc هستند. V بیانگر ولتاژ شبکه و Tdqo ماتریس تبدیل که در [13] آمده است.

حال با توجه به رابطه (۱۶) مقدار توان های اکتیو و راکتیو متناظر با جریان $I_L$ حاصل می شود.

$$\begin{bmatrix} P_L \\ Q_L \end{bmatrix} = \frac{3}{2}\begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \end{bmatrix} \quad (16)$$

حال با عبور توان های رابطه (۱۶) از یک فیلتر پایین گذر مقادیر متوسط و نوسانی توان ها مطابق روابط (۱۷) و (۱۸)تفکیک می شوند.

$$P_L = \overline{P_L} + \widetilde{P_L} \quad (17)$$
$$Q_L = \overline{Q_L} + \widetilde{Q_L} \quad (18)$$

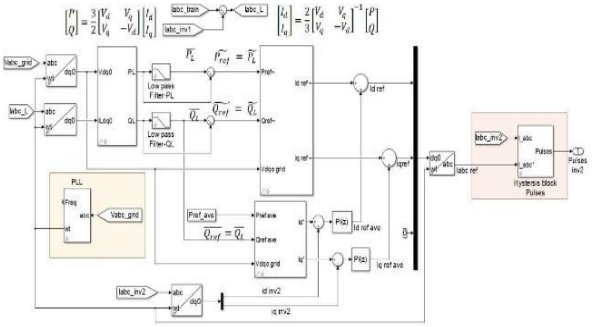
که مقدار نوسانی توان های اکتیو و راکتیو روابط (۱۷) و (۱۸) به عنوان توان های مرجع اکتیو و راکتیو نوسانی که اینورتر(۲) باید تزریق نماید، فرض می شود بنابراین روابط (۱۹)و (۲۰) به دست می آیند.

$$\widetilde{P_{ref}} = \widetilde{P_L} \quad (19)$$
$$\widetilde{Q_{ref}} = \widetilde{Q_L} \quad (20)$$

شکل (۱۱) کنترل کامل اینورتر (۲) را نشان می دهد.

## ۶- نتایج شبیه سازی

کلیه ی بخش های مطرح شده در مقاله، در برنامه Matlab/Simulink شبیه سازی شده و در طول مدت ۳۶۰ ثانیه، خروجی گرفته شده است. به منظور مشخص بودن نتایج، ۶ حالتی که در جدول (۱) آمده است مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج مطالعات با توجه به حضور و عدم حضور FDG و نیز اهداف مقاله در سه بخش زیر ارائه گشته است.



**شکل (۱۱): مدل کنترل اینورتر (۲) به منظور تامین توان قطار، بهبود ضریب توان و کاهش THD جریان شبکه**

### ۶-۱- تامین توان قطار و ضریب قدرت واحد شبکه

در مطالعات انجام شده میزان انتقال توان اکتیو و راکتیو شبکه ی ۶۳ کیلوولت به سوی شبکه ی پایین دست مورد محاسبه قرار گرفته که این مقادیر با توجه به حضور و عدم حضور FDG در جدول (۲) آمده است، مطابق این جدول مشخص است که در حضور FDG و میزان توان دهی آن تا چهاربرابر حداکثر توان بار، شبکه بالادست در همه ی موارد مصرف کننده خواهد بود که این مطلب با علامت (-) در جدول (۲) مشخص گشته است و موجب بهبودی ضریب قدرت به مقدار واحد در همه ی ۶ حالت مطالعه گشته است.

[ Downloaded from iejqp.ir on 2026-10-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.3.0 ]

جدول (۲): میزان توان اکتیو و راکتیو و ضریب قدرت شبکه در حالت قبل و بعد پیاده سازی FDG

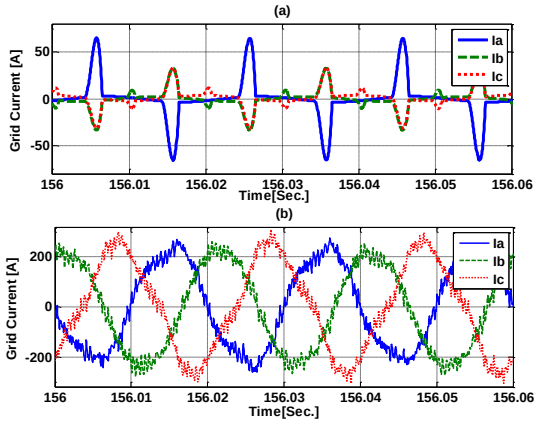
| حالتها | از دید شبکه بدو ن FDG | | | از دید شبکه با FDG | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P(Mw) | Q(Mvar) | PF | P(Mw) | Q(Mvar) | PF |
| 1 | 7.62 | 3.3 | 0.917 | -13.5 | 1.044 | 0.997 |
| 2 | 2.4 | 0.62 | 0.968 | -17.94 | -0.53 | 0.999 |
| 3 | 0.18 | 0.164 | 0.74 | -18.7 | -0.573 | 0.999 |
| 4 | 2.469 | 0.809 | 0.9503 | -18.3 | -0.389 | 0.9998 |
| 5 | 3.98 | 1.06 | 0.966 | -16.96 | -2.303 | 0.9909 |
| 6 | 0.248 | 0.124 | 0.894 | -18.88 | - 0.489 | 0.9997 |

## ۶-۲- بهبود نامتعادلی جریان شبکه

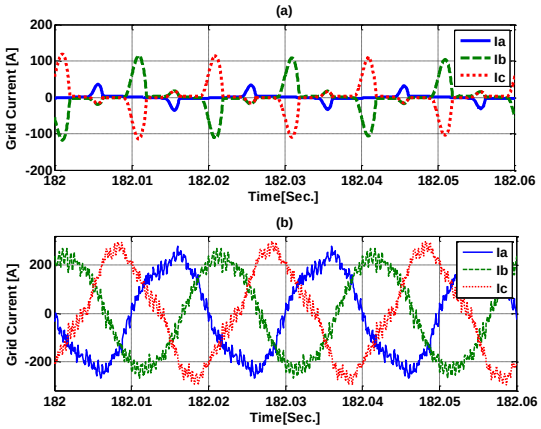
از جمله موارد تحقق یافته در این مطالعه، دستیابی به شاخص نامتعادلی قابل قبول در جریان شبکه می باشد. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می گردد بدترین وضعیت نامتعادلی جریان مربوط به دو حالت (۴) و (۵) می باشد که دو قطار در حال انجام دو حرکت متفاوت هستند که در پی حضور FDG، با کاهش ۹۳.۱۹، ۹۲.۶۶ درصدی نامتعادلی جریان مواجه شده اند که این موضوع از قیاس دامنه ی شکل موج های جریان های شبکه در حالت های حضور FDG با عدم حضور آن ( شکل های (۱۲) و (۱۳)) قابل رویت می باشد.

جدول (۳): میزان نامتعادلی در حالت قبل و بعد پیاده سازی FDG

| حالتها | بدون FDG | با FDG |
|---|---|---|
| | $\frac{I_-(1)}{I_+(1)}(\%)$ | $\frac{I_-(1)}{I_+(1)}(\%)$ |
| 1 | 6 | 5 |
| 2 | 4.15 | 2.2 |
| 3 | 11.93 | 3. 05 |
| 4 | 66.2 | 4.51 |
| 5 | 64.6 | 4.74 |
| 6 | 16.6 | 3.18 |




شکل (۱۲): جریان های سه فاز شبکه در مطالعه چهارم (a) بدون حضور FDG (b) با FDG




شکل (۱۳): جریان های سه فاز شبکه در مطالعه پنجم (a) بدون حضور FDG (b) با FDG

## ۶-۳- کاهش میزان THD جریان شبکه

به منظور بررسی سیستم کنترل در کاهش میزان هارمونیک های جریان در شبکه ی بالاسری ناشی از بار قطار، جدول (۴) تهیه شده است که میانگین THD سه فاز جریان شبکه در هر ۶ حالت مطالعه در حضور FDG و عدم حضور آن را در بر می گیرد که در مطالعه ی اول بدون حضور FDG، به دلیل بالا بودن توان و جریان کشیده شده از سوی هر دو قطار بیشترین مقدار هارمونیک دیده خواهد شد که در اثر حضور FDG، میانگین THD سه فاز کاهش ۸۸.۵۹درصدی خواهد داشت که بیشترین میزان کاهش هارمونیک می باشد و در مطالعه ی سوم نیز به دلیل آنکه هر دو قطار در حالت ترمزی قرار دارند جریان کشیده شده از شبکه در حالت عدم حضور سیستم کنترل بسیار کم می باشد و لذا از نقطه نظر هارمونیکی نیز تاثیر چندانی بر روی شبکه بالاسری نمی تواند



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.3.0 ]

داشته باشد لذا حضور FDG، کمترین تاثیرگذاری را در این حالت خواهد داشت.

**جدول (۴): مقادیر میانگین THD جریان های های سه فاز شبکه بالاسری در حالت حضور و عدم حضور FDG**

| حالتها | بدون FDG | با FDG |
|---|---|---|
| | THD(%) | THD(%) |
| **1** | 123.8 | 14.12 |
| **2** | 101.8 | 18.74 |
| **3** | 13.64 | 13.43 |
| **4** | 119.8 | 13.68 |
| **5** | 114.7 | 14.86 |
| **6** | 40.32 | 13.41 |

## ۷- نتیجه

بنابراین در این مقاله پس از شبیه سازی اجزاء مورد مطالعه توانسته شد که با کنترل مبدل دوبل سیستم FDG، علاوه بر تامین توان بار قطار و تزریق توان به شبکه، میزان نامتعادلی و هارمونیک های ایجاد شده در جریان شبکه ۶۳Kv کاهش و ضریب قدرت از دید این شبکه واحد گردد.

## ۸- مراجع


[1] J.P. Torreglosa, P.García, L.M. Fernández and F.Jurado "Predictive Control for the Energy Management of a Fuel-Cell–Battery–Supercapacitor Tramway",*IEEE Trans. Industrial Informatics*, vol. 10, Feb 2014, pp.1-10.

[2] Qi Li, Weirong Chen, Zhixiang Liu, Ming Li and Lei Ma "Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway" *Journal of Power Sources* , vol 279, App 2015, pp. 267–280.

[3] L. Fan and Y. Zhen-yu, "Analysis and management research on the impact of Shanghai-Nanjing intercity railway traction load on power grid," in *China Int. Conf. Elect. Distrib. (CICED)*, 2010, pp. 1-6.

[4] Hosseini, S.H.; Sarhangzadeh, M.; Shahnia, F. "A Novel Control Scheme of the Statcom for Power Quality Improvement in Electrified Railways",Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE, pp. 1-5.

[5] G. Zhu, J. Chen, and X. Liu, "Compensation for the negative-sequence currents of electric railway based on SVC," in *IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, 2008, pp. 1958-1963.

[6] S.-Y. Lee, C.-J. Wu, and W.-N. Chang, "A compact control algorithm for reactive power compensation and load balancing with static Var compensator," *Elect. Power Syst. Research*, vol. 58, pp. 63-70, 2001.

[7] M. El-Sadek, "Static VAR compensation for phase balancing and power factor improvement of single phase train loads," *Elect. mach. power syst.*, vol. 26, pp. 347-361, 1998.

[8] A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai, and F. Ma, "Railway static power conditioners for high-speed train traction power supply systems using three-phase V/V transformers," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, pp. 2844-2856, 2011.

[9] S. Zhuo, J. Xinjian, Z. Dongqi, and Z. Guixin, "A novel active power quality compensator topology for electrified railway," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, pp. 1036-1042, 2004.

[10] N. Y. Dai, K. W. Lao, M. C. Wong, and C. K. Wong, "Hybrid power quality conditioner for co-phase power supply system in electrified railway," *IET Power Electron.*, vol. 5, pp. 1084-1094, 2012.

[11] N. Dai, K. Lao, and M. Wong, "A hybrid railway power conditioner for traction power supply system," in *IEEE Appl. Power Electron. Conf. Exposition*, 2013, pp. 1326-1331.

[12] S. Zeliang, X. Shaofeng, and L. Qunzhan, "Single-Phase Back-To- Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation, and Harmonic Filtering in Traction Power System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, pp. 334-343, 2011.

[13] H.Akagi, E.H.Watanabe, M.Aredes, "Instantaneous power theory and applications to power conditioning",John Wiley & Sons, 2007/3/9.

[14] C.J.Gajanayake,D. M,Vilathgamuwa,P.C. Loh, R.Teodorescu and F.Blaabjerg, "Z-Source-Inverter-Based Flexible Distributed Generation System Solution for Grid Power Quality Improvement*",IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 24, no. 3, Sept 2009, pp.1-10.

[15] H. Akagi, "Active harmonic filters, " *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, Dec. 2005.

[16] B. Singh and J. Solanki, "A comparison of control algorithms for DSTATCOM, " *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 7, pp. 2738–2745, Sep. 2009.

[17] P. S. Sensarma, K. R. Padiyar, and V. Ramanarayanan, "Analysis and performance evaluation of a distribution STATCOM for compensating voltage fluctuations, " *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp.259–264, Apr. 2001.

[18] T.Kulworawanichpong, "Optimizing AC Electric Railway Power Flows With Power Electronic Control",Phd Thesis, University of Birmingham, pp. 1-186,Nov. 2003.

[19] H.Hu, Z.He,K.Wang, X.Ma and S.Gao ,"Power Quality Impact Assessment for High-speed Railway Associated with High-speed Trains Using Train Timetable —Part II: Verifications, Estimations and Applications", *IEEE Trans. Power Delivery*, pp. 1-10,Sept. 2015.

[20] B. B., M. P., P. M., S. R., and V. F., "Digital Control and Simulation for Power Electronic Apparatus in Dual Voltage Railway Locomotive," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.18, pp. 1146-1157, 2003.

[21] S. Dieckerhoff, S. Bernet, and D. Krug, "Power loss-oriented evaluation of high voltage IGBTs and multilevel converters in transformerless traction applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, pp. 1328-1336, 2005.

[22] J. Dixon, J. Pereda, C. Castillo, and S. Bosch, "Asymmetrical Multilevel Inverter for Traction Drives Using Only One DC Supply," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, pp. 3736-3743, 2010.


[ Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.3.0 ]

[23] D. Zhong, B. Ozpineci, L. M. Tolbert, and J. N. Chiasson, "AC Cascaded H-Bridge Multilevel Boost Inverter With No Inductors for Electric/Hybrid Electric Vehicle Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, pp. 963-970, 2009.
[24] B. A., P.-D. M., D. P., R. Peña-Eguiluz, V. P. E., and K. X., "Weighted Control of Traction Drives With Parallel-Connected AC Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, pp. 1799- 1806, 2006.
[25] P. Drabek, Z. Peroutka, M. Pittermann, Ce, x, and M. dl, "New Configuration of Traction Converter With Medium-Frequency Transformer Using Matrix Converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, pp. 5041-5048, 2011.
[26] G. W. Chang, H. W. Lin and S. K. Chen, "Modeling characteristics of harmonic currents generated by high-speed railway traction drive converters,"*IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 2, pp. 766-773, April 2004.
[27] S. M. Mousavi G., A.Tabakhpour L. ,E.F. Fuchs and K.Al-Haddad, "Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective",*IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.62, pp.1-10,Des 2014.
[28] R. Barnes and K. T. Wong, "Unbalance and harmonic studies for the Channel Tunnel railway system," *IEE Proc. Elect. Power Appl.*, vol. 138, pp. 41-50, 1991.

[ Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.3.0 ]