

بسمه تعالی

❖ وجه تمایزهای پروژه قطار پرسرعت نسبت به پروژه قطار ملی

تفاوت‌های اصلی ایجاد شده در پروژه قطار پرسرعت ناشی از دو عامل افزایش سرعت و افزایش سطح ولتاژ می‌باشد که در ادامه تاثیرات هر کدام از آن‌ها در سیستم رانش بررسی خواهد شد.

❖ تاثیر افزایش ولتاژ

الف) سطح ولتاژ در قطار پرسرعت

در قطارهای پرسرعت (HSR) حداقل ولتاژ ۲۵ کیلوولت در نظر گرفته می‌شود، در صورتیکه ولتاژ قطارهای معمولی کمتر از این مقدار می‌باشد. خطوط با سطح ولتاژ بالاتر، تلفات کمتری در طول تبدیل و انتقال انرژی از نیروگاه به قطار دارند. در قطارهایی که با خط ۳ کیلوولت DC تغذیه می‌شوند، باید ۲۲,۶٪ انرژی بیشتر از انرژی دریافتی پانتوگراف تولید شود. این درحالی‌است که برای قطارهایی که توسط خط ۲۵ کیلوولت AC تغذیه می‌شوند، تنها ۸٪ انرژی بیشتر از دریافتی پانتوگراف باید در نیروگاه تولید شود. مزیت دیگر استفاده از خط ۲۵ کیلوولت AC، امکان تامین برق قطارهای پرسرعت با فاصله بیشتر بین پست‌ها می‌باشد که به معنای کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری است. بنابراین HSR را می‌توان با ولتاژ پایین‌تر تغذیه کرد، اما نتیجه آن، افزایش انتشار دی اکسید کربن و افزایش هزینه ساخت و نگهداری خطوط HSR می‌باشد [1-5].

در پروژه قطار ملی سطح ولتاژ خط تغذیه سیستم رانش ۷۵۰ ولت DC می‌باشد. از آنجاییکه قطار پرسرعت برای مسافت‌های طولانی و بین شهری استفاده می‌شود امکان استفاده از سطح ولتاژ ۷۵۰ ولت به علت افزایش تلفات خط وجود نخواهد داشت.

ب) مبدل Active Front End

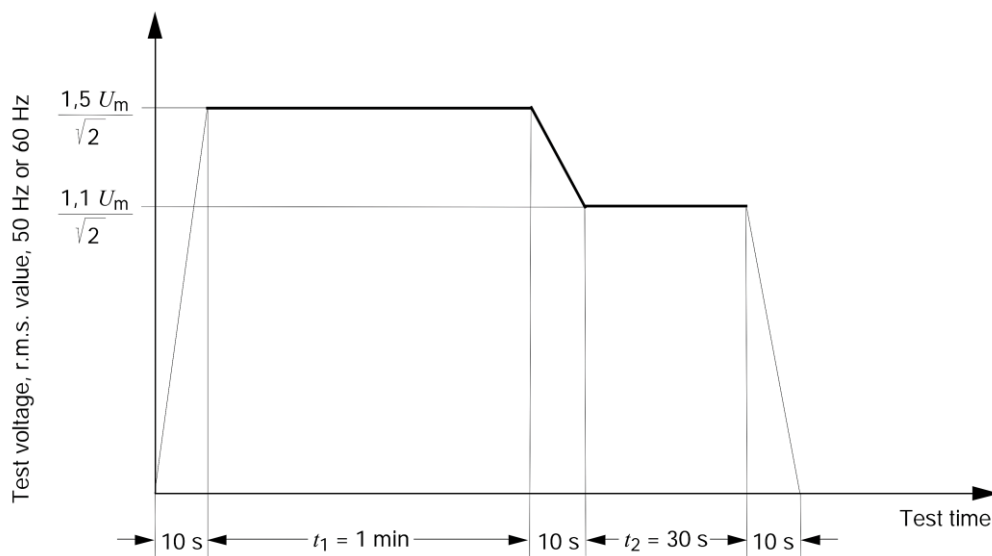
در پروژه قطار پرسرعت ولتاژ AC ۲۵ کیلوولت از طریق خط بالاسری و از مسیر پانتوگراف وارد ترانسفورماتور تک فاز کاهنده شده و پس از آن وارد مازول Active Front End (AFE) می‌شود که وظیفه آن یکسوسازی ولتاژ و فراهم کردن یک ولتاژ DC با سطح مشخص و کیفیت مطلوب می‌باشد. یکسوساز AFE (یا یکسوساز PWM) نسبت به سایر یکسوسازهای متداول دیودی و ترისტوری برتری‌هایی دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از؛ افزایش ضریب قدرت سمت AC تا نزدیک یک ($\text{Power Factor} \cong 1$)، کاهش موثر اندازه THD جریان، قابلیت کنترل مستقل توان اکتیو و توان راکتیو و کنترل بهتر سطح ولتاژ DC در زمان بروز تغییرات ولتاژ AC در سمت ورودی و در زمان ترمز. با افزایش ضریب قدرت در این ساختار حجم ترانسفورماتور و مبدل در مقایسه با سایر ساختارها

کاهش می‌یابد. یکسوساز AFE به علت سرعت عملکرد بالایی که دارد در زمان تغییرات ولتاژ AC و تغییرات توان تزریقی و توان دریافتی از لینک DC می‌تواند به سرعت تعادل توان را برقرار کند و ولتاژ DC را در سطح مطلوب نگه دارد. در قطارهای پرسرعت ترمز الکتریکی نقش مهمی در افزایش ایمنی و بازده دارد. از آنجایی که سرعت در این نوع قطارها بالا می‌باشد بنابراین در هنگام ترمز انرژی زیادی از سمت موتورهای به سمت لینک DC اینورتر بازگشت داده خواهد شد. با توجه به سرعت عملکرد بالای مبدل AFE در کنترل ولتاژ لینک DC و توان اکتیو، انرژی بازگشت داده شده به لینک DC می‌تواند از طریق آن به شبکه بازگشت داده شود.

ذکر این نکته لازم است که تاکنون در جهاد دانشگاهی علم و صنعت این مبدل ساخته نشده است و همچنین در هیچ کدام از پروژه‌های ریلی کشور از چنین تبدیلی برای یکسوسازی استفاده نشده است. این در حالی است که در اکثر پروژه‌های قطار پرسرعت در دنیا به علت مزایای ذکر شده که منجر به کاهش حجم و افزایش بازده می‌شود از این نوع مبدل برای یکسوسازی بهره برده شده است.

ج) تست تخلیه جزئی

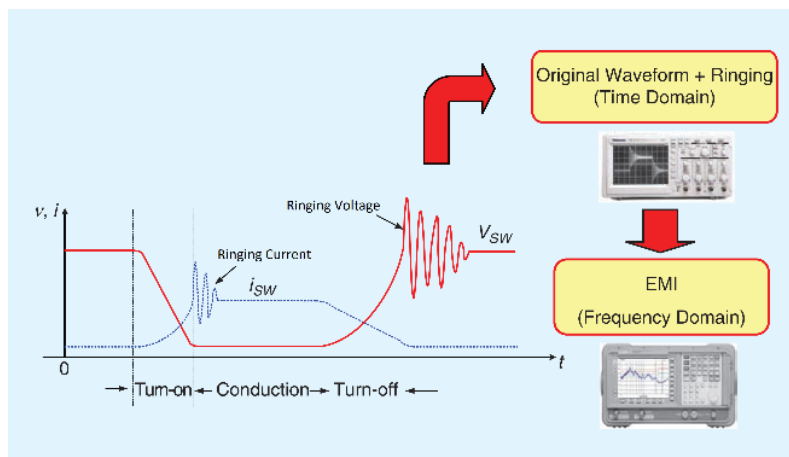
با افزایش سطح ولتاژ از ۷۵۰ ولت به ۱۵۰۰ ولت الزامات عایقی تجهیزات نیز تغییر می‌کند. برای مثال در استاندارد IEC-61287-1 برای تجهیزاتی که با سطح ولتاژ ۱۵۰۰ ولت و بالاتر کار می‌کنند تست تخلیه جزئی (Partial discharge test) باید انجام شود. این آزمایش برای بررسی عایق بودن اجزای اصلی یا اجزای فرعی انجام می‌شود. منحنی تست تخلیه جزئی در شکل زیر قابل مشاهده می‌باشد [1]. بنابراین تست تخلیه جزئی و مسائل عایقی با افزایش سطح ولتاژ پیچیده‌تر خواهد شد.



شکل ۱: منحنی تست تخلیه جزئی برای سطح ولتاژ ۱۵۰۰ ولت و بالاتر

د) تداخلات الکترومغناطیسی (EMI)

همانطور در شکل ۲ نشان داده شده است، نوسانات گذرای ولتاژ و جریان^۱ یکی از عوامل ایجاد اختلالات الکترومغناطیسی^۲ است. با افزایش سطح ولتاژ، نوسانات گذرای ولتاژ و جریان^۳ افزایش می‌یابد. در این صورت، طیف گسترده‌ای از اختلالات الکترومغناطیسی با افزایش سطح ولتاژ ایجاد می‌شود. بنابراین، هرچه فرکانس سوئیچینگ و ولتاژ باس DC اینورتر بیشتر باشد، تداخل الکترومغناطیسی ناشی از اینورتر مشکل‌سازتر خواهد بود. طبق استاندارد EN 50121، تست سازگاری الکترومغناطیسی^۴ سیستم رانش قطار پرسرعت (با سطح ولتاژ تغذیه ۱۵۰۰ ولت DC) دارای پیچیدگی بالاتری نسبت به سیستم رانش قطارهای عادی (با سطح ولتاژ تغذیه ۷۵۰ ولت DC) می‌باشد [6].



شکل ۲: منابع تولید تداخل الکترومغناطیسی

ه) موتور ترکشن

موتور ترکشن استفاده شده در قطار پرسرعت یک موتور القایی قفس سنجابی از نوع راه اندازی با اینورتر است. موتورهای القایی قفس سنجابی به علت استحکام مکانیکی بالا، ظرفیت اضافه بار قابل قبول و همچنین امکان درایو دو یا چند موتور با یک واحد کنترل مبدلی یکی از اصلی‌ترین گزینه‌ها برای به‌کارگیری به عنوان موتور ترکشن در پروژه‌های قطارهای پرسرعت است.

با افزایش سطح ولتاژ درایو موتور ترکشن به علت اینکه سیم پیچ‌های موتور در مواجهه با ولتاژهای هارمونیک با زمان صعود کوتاه قرار می‌گیرد؛ در نتیجه عایق‌بندی سیم‌بندی باید برای جلوگیری از تخلیه‌های جزئی طراحی

¹ Fast Transient Voltage and Current

² Electromagnetic Interface (EMI)

³ Ringing Voltage and Current

⁴ Electromagnetic Compatibility (EMC)

شود. از طرفی به علت تغییر عایق‌بندی و در نتیجه تغییر فضای اسلات‌های استاتور ساختار هندسی هسته استاتور تغییر خواهد کرد [7-10].

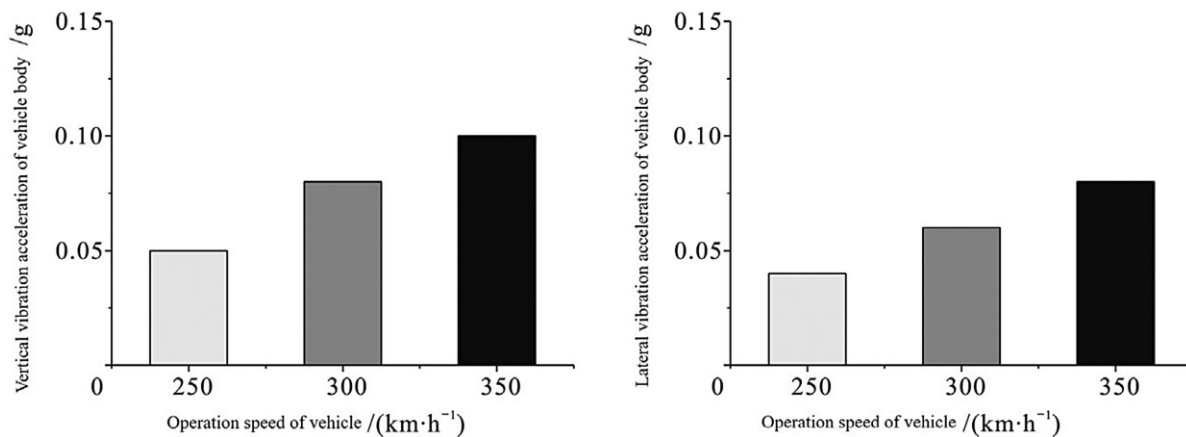
(و) ماژول مبدل کمکی (Auxiliary Converter Module)

در پروژه‌های قطار پرسرعت بحث کاهش حجم و افزایش بازده همواره مورد توجه بوده است. از این رو نیمه هادی‌های با تکنولوژی Wide-Band Gap Devices نظیر نیمه هادی SiC (سیلیکون-کارباید) در پروژه‌های پیشرو مانند خط Shinkansen مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین هدف ما در پروژه قطار پرسرعت استفاده از نیمه هادی‌های SiC در ماژول مبدل کمکی به‌منظور بهره‌مندی از مزایای ذکر شده می‌باشد [11].

❖ تاثیر افزایش سرعت

الف) ارتعاش (Vibration)

پاسخ قطارهای پرسرعت تحت سرعت‌های عملیاتی متفاوت متغیر است. با مقایسه شتاب ارتعاش بدنه واگن در پاسخ‌های شتاب عمودی^۵ و جانبی^۶ بر روی واگن‌های یک قطار پرسرعت تحت سرعت‌های ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلومتر می‌توان مشاهده کرد، که ارتعاش بدنه روی قطار به وضوح با افزایش سرعت قطار افزایش می‌یابد. بنابراین طراحی باکس‌های قطار پرسرعت به نحوی که بتوانند الزامات استاندارد IEC61373 (مربوط به تست ارتعاش) را با موفقیت طی کنند سخت‌تر خواهد بود [2].



شکل ۳: مقایسه شتاب ارتعاش بدنه قطار در سرعت یکسان

^۵ vertical acceleration

^۶ lateral acceleration

ب) سیستم TCMS

سیستم سیگنالینگ نیز به سرعت قطار بستگی دارد. خطوط راه آهن با سرعت کمتر از ۱۶۰ کیلومتر در ساعت از سیگنال های کنار مسیر^۷ برای کنترل حرکات ایمن قطارها استفاده می کنند، اما اگر سرعت از ۱۶۰ کیلومتر در ساعت بیشتر شود، راهبر نمی تواند به طور قابل اطمینانی سیگنال های قرار گرفته در مسیر را بخواند. بنابراین، برای سرعت بالای ۱۶۰ کیلومتر در ساعت، از سیگنالینگ آنبرد^۸ استفاده می شود [5].

ج) موتور ترکشن

به منظور طراحی موتوری با سرعت نسبتا بالا به گونه ای که موتور طراحی شده در برابر تغییرات دینامیکی سرعت پاسخ بالایی داشته باشد باید طول و قطر نهایی روتور به گونه ای طراحی شود که اینرسی لحظه ای موتور نسبتا کاهش یابد و سطح توان موتور افزایش یابد.

طراحی میله های روتور عموما به صورت آلومینیوم ریخته شده است تا مقاومت بالای میله های روتور میزان حساسیت عدم هماهنگی در درایو موتورها در حالت موازی، به اختلاف قطر چرخ ها که عموما بین ۰.۴ تا ۱ درصد است را به حداقل برساند. اما در قطار پر سرعت بر اساس تحقیقات جدید صورت گرفته و مبحث صرفه جویی در انرژی و بازگشت سرمایه، میل به طراحی و به کارگیری میله های مسی در روتور در حال افزایش است؛ که این خود سبب طراحی مجدد موتور با این الزامات می شود [7-10].

یکی دیگر از مباحثی که در طراحی موتور قطار پرسرعت باید در نظر گرفت شیوه خنک سازی موتور است که به علت افزایش سرعت موتور باید طراحی به گونه ای باشد؛ که الزامات خنک سازی صحیح و الزامات مکانیکی که از مهم ترین موارد آن، کمینه کردن نویز مکانیکی است؛ را برآورده سازد.

د) اینورتر موتور ترکشن

باتوجه به توضیحات ارائه شده در بندهای قبلی در قطارهای پرسرعت بحث ارتعاش و نویز بسیار جدی تر از قطارهای معمولی می باشد. از طرفی با افزایش سرعت در قطارهای پرسرعت، دیگر اثرات هارمونیک های گشتاور در موتورهای ترکشن قابل چشم پوشی نیستند. رپل موجود در گشتاور موتورهای ترکشن که ناشی از وجود هارمونیک در جریان تغذیه موتور (که توسط ولتاژ خروجی اینورتر دوسطحی ایجاد می شود) می باشد، می تواند باعث تشدید این مسائل شود. در واقع وجود رپل گشتاور در قطارهای پرسرعت می تواند باعث افزایش ارتعاشات و افزایش

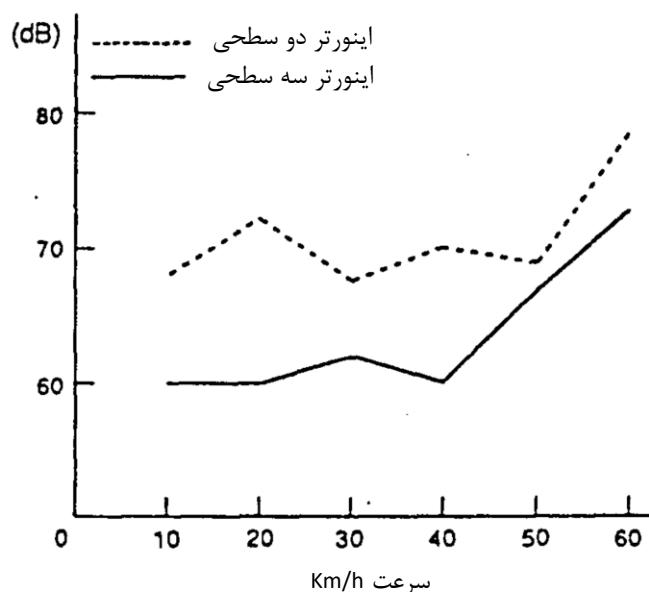
⁷ trackside signals

⁸ onboard signalling

نویزهای صوتی در سرعت‌های بالاتر شده و راحتی و آسایش مسافران را تحت تاثیر قرار دهد و علاوه بر آن بر سایش چرخ‌ها تاثیر گذار باشد [11-13].

حال اگر برای درایو موتورهای ترکشن از اینورتر سه سطحی به جای اینورتر دو سطحی استفاده شود مشکلات ذکر شده ناشی از ریپل گشتاور موتور به شدت کاهش خواهد یافت. مزیت‌های استفاده از توپولوژی اینورتر سه سطحی برای درایو موتورهای ترکشن عبارتند از:

- در مقایسه با مبدل دو سطحی ولتاژ تحویلی به موتور سینوسی‌تر می‌باشد. بنابراین مولفه‌های هارمونیک ولتاژ خروجی اینورتر سه سطحی کمتر از ولتاژ خروجی اینورتر دو سطحی در فرکانس سوئیچینگ یکسان خواهد بود.
- پایین‌تر بودن سطح هارمونیک‌های ولتاژ در مبدل سه سطحی موجب می‌شود که اعوجاج جریان موتور نسبت به مبدل دو سطحی کمتر شود. این بدان معنی است که ریپل گشتاور موتور کاهش می‌یابد و با این کار نویزهای صوتی و ارتعاشات مربوط به موتورهای ترکشن و همچنین اثر نوسانات گشتاور برروی سایش چرخ‌ها کاهش می‌یابد. کاهش نویز را می‌توان در شکل ۴ مشاهده نمود.
- در مبدل سه سطحی ولتاژ بلاک (blocking voltage) هر IGBT تنها به ۵۰ درصد ولتاژ کاری لینک DC محدود می‌شود. بنابراین در این مبدل می‌توان از IGBT‌هایی با ولتاژ شکست کمتر از ولتاژ خط DC برای درایوهای ترکشن استفاده کرد.



شکل ۴: کاهش نویز در قطار کنترل شده با اینورتر سه سطحی در مقایسه با اینورتر دو سطحی (اندازه‌گیری شده در نقطه مرکزی بوژی).

❖ نتیجه گیری

در گزارش اجمالی و مختصر تهیه شده تا حدودی به تفاوت های موجود در سیستم رانش قطار معمولی و قطار پرسرعت اشاره شد که نشان دهنده تفاوت های اساسی در طراحی و پیاده سازی سیستم رانش این دو نوع قطار بود.

❖ مراجع

- [1] IEC 61287-1:2014 Railway applications - Power converters installed on board rolling stock - Part 1: Characteristics and test methods.
- [2] Ivanov, N. I., I. S. Boiko, and A. E. Shashurin. "The problem of high-speed railway noise prediction and reduction." *Procedia Engineering* 189 (2017): 539-546.
- [3] de Fer, Union Internationale des Chemins. "High speed rail." *Fast track to sustainable mobility*. UIC, Paris (2008).
- [4] Yi, S. "Strengthening of the railway transport capacity." *Principles of Railway Location and Design* (2018): 473-534.
- [5] Watson, Inara. "High-Speed Railway." *Encyclopedia* 1.3 (2021): 665-688.
- [6] Tarateeraseth, V. (2011, May). EMI Filter Design Part I: Conducted EMI Generation Mechanism. In *IEEE Electromagn. Conf* (pp. 44-50).
- [7] Nategh, S., Lindberg, D., Brammer, R., Boglietti, A., & Aglen, O. (2018, September). Review and trends in traction motor design: Electromagnetic and cooling system layouts. In *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 2600-2606). IEEE.
- [8] Zoeller, C., Vogelsberger, M. A., Wolbank, T. M., & Ertl, H. (2016). Impact of SiC semiconductors switching transition speed on insulation health state monitoring of traction machines. *IET Power Electronics*, 9(15), 2769-2775.
- [9] Setiyoso, A., Hindersyah, H., Purwadi, A., & Rizqiawan, A. (2014, November). Design of traction motor 180kW type SCIM for KRL (EMU) Jabodetabek re-powering project. In *2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS)* (pp. 341-344). IEEE.
- [10] Nategh, S., Boglietti, A., Liu, Y., Barber, D., Brammer, R., Lindberg, D., & Aglen, O. (2020). A review on different aspects of traction motor design for railway applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), 2148-2157.
- [11] Sato, Kenji, Hirokazu Kato, and Takafumi Fukushima. "Development of SiC applied traction system for Shinkansen high-speed train." *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia)*. IEEE, 2018.

[12] Cheok, Adrian David, et al. "High power AC/DC converter and DC/AC inverter for high speed train applications." 2000 TENCON Proceedings. Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium (Cat. No. 00CH37119). Vol. 1. IEEE, 2000.

[13] Qi, Yayun, and Huanyun Dai. "Influence of motor harmonic torque on wheel wear in high-speed trains." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 234.1 (2020): 32-42.