
Modern Topology and Thermal Analysis of Drive for Variable-Speed Pumped Storage Power Plants

Mohammad Reza Semsar¹, Seyed Mohammad Hassan Hosseini^{2*}, Seyed Babak Mozaffari³, Seyed Ebrahim Afjei⁴

¹ Department of Electrical Engineering, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
mohammadreza.semsar@srbiau.ac.ir

² Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
smhh110@azad.ac.ir (**Corresponding author**)

³ Department of Electrical Engineering, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
mozafari_babak@yahoo.com

⁴ Department of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Afjei@yahoo.com

Abstract

Given the significant power generation and consumption of variable-speed pumped storage power plants (VSPSPs), it is crucial to enhance drive methods and decrease drive losses, thereby increasing productivity. This paper proposes a topology for VSPSP drivers with two-level voltage source converters (2LVSC) with 6+1 converters. Hydraulic and electrical VSPSP models are first presented and then, VSPSP drivers are introduced. Likewise, a drive switching and control method is described, and 2LVSC (6+1) is introduced. Subsequently, VSPSP drivers with 6+1 modules are proposed as a novel topology. The thermal loss model of the driver is subsequently introduced and the thermal losses of one driver are simulated and evaluated. The simulation results demonstrate that the driver with 2LVSC (6+1) based on a direct torque and flux control (DTFC) scheme as a VSPSP driver increases the Mean Time Between Failures (MTBF) and speeds maintenance in driver and VSP. The thermal model presented here shows that the driver temperature stabilizes during the entire duty cycle. Eventually, the outputs of the project are simulated in MATLAB 2021/Plexim software and validated and verified using a sample of a 2.2-kW variable-speed wind power plant (VSWP).

Keywords: DTFC, 2LVSC (6+1), driver converters (6+1), Thermal model, VSPSP.

Submit date: 2022/12/28
Accepted date: 2023/09/10

Corresponding author's name: Seyed Mohammad Hassan Hosseini

Corresponding author's Address: Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

توپولوژی جدید و تحلیل حرارتی درایو در نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای با

سرعت متغیر

نوع مطالعه: پژوهشی

محمد رضا سمسار^۱، سید محمد حسن حسینی^۲، سید بابک مظفری^۳، سید ابراهیم افجه‌ای^۴

۱- گروه مهندسی برق- واحد علوم و تحقیقات تهران- دانشگاه آزاد اسلامی- تهران- ایران
mohammadreza.semsar@srbiau.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق- واحد تهران جنوب- دانشگاه آزاد اسلامی- تهران- ایران
smhh110@azad.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق- واحد علوم و تحقیقات تهران- دانشگاه آزاد اسلامی- تهران- ایران
mozafari_babak@yahoo.com

۴- گروه مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
Afjei@yahoo.com

چکیده: با توجه به تولید و مصرف انرژی قابل توجه در نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای با سرعت متغیر (VSPSP)، بهبود روش‌های درایو و کاهش تلفات درایو و در نتیجه افزایش بهره‌وری بسیار مهم است. این مقاله توپولوژی را برای درایورهای VSPSP با مبدل‌های منبع ولتاژ دو سطحی (2LVSC) با کانورترهای ۶+۱ پیشنهاد می‌کند. مدل‌های VSPSP هیدرولیک و الکتریکی ارائه شده است که در ادامه درایور VSPSP معرفی می‌شوند. به همین ترتیب، روش‌های سوئیچینگ و کنترل درایو توضیح داده شده و درایور با 2LVSC (6+1) معرفی شده است. در همین راستا، درایور VSPSP با کانورترها با آرایش ۶+۱ به عنوان یک توپولوژی جدید پیشنهاد می‌شوند و در ادامه، مدل‌های تلفات حرارتی این درایور نیز معرفی می‌شوند و تلفات حرارتی درایور جدید شبیه‌سازی و تحلیل می‌شوند و در نهایت نمونه VSPSP ۲۵۰ مگاوات مورد نظر شبیه‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاربرد درایور با 2LVSC (6+1) بر اساس کنترل مستقیم گشتاور و شار (DTFC) به عنوان یک درایور VSPSP منجر به افزایش سرعت تعمیر، نگهداری و افزایش مدت زمان مابین هر خرابی (MTBF) درایور و VSPSP شده است و مدل حرارتی پیشنهادی، منجر به تثبیت دمای درایور در کل فرآیند تغییر سرعت شده است؛ خروجی‌های این پروژه در نرم‌افزار MATLAB 2021/Plexim شبیه‌سازی و با نتایج شبیه‌سازی یک نمونه ۲/۲ کیلووات در نیروگاه بادی با سرعت متغیر (VSWP) مقایسه، تأیید و راستی آزمائی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: DTFC، 2LVSC (6+1)، کانورترهای درایور (۶+۱)، مدل حرارتی، VSPSP.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

نام نویسنده مسئول: سید محمد حسن حسینی

نشانی نویسنده مسئول: گروه مهندسی برق- واحد تهران جنوب- دانشگاه آزاد اسلامی- تهران- ایران

۱- مقدمه

بردارهای ولتاژ منفی و فعال و ولتاژهای شبکه نامتعادل با معرفی دو بردار اضافی قابل حل هستند. در (Hafeez, Uddin & Rahim, 2014)، یک DTC مبتنی بر کنترل‌کننده عصبی فازی نوع Sugeno خودتنظیم‌شده برای یک موتور القایی قفس سنجایی ۱ اسب بخاری پیشنهاد شد که منجر به بهبود عملکرد دینامیکی و کاهش امواج گشتاور می‌شود؛ با اعمال سیگنال‌های صحیح به درایو روتور که توان اسمی آن تنها کسری از توان اصلی تعریف‌شده در سمت استاتور DFIM است؛ می‌توان به انواع ویژگی‌های کنترل دسترسی داشت. این کسر حداکثر مقدار لغزش روتور را در شرایط عملیاتی حالت پایدار تقریب می‌زند که بر این اساس، DFIM می‌تواند عملکرد مناسبی را در محدوده خاصی از تولید برق تحت شرایط عملیاتی لغزش کوچک نشان دهند. اگرچه کاربرد سیستم‌های بادی در حال توسعه است؛ نقص‌های اولیه DFIMها به طور فزاینده‌ای آشکار شده‌اند و به اختلالات شبکه بسیار حساس هستند. کاهش ولتاژ می‌تواند باعث ایجاد اضافه ولتاژ و جریان اضافی در سیم‌پیچ‌های روتور شود که در صورت عدم انجام اقدامات متقابل باعث از کار افتادن مدار می‌شود. تحقیقات گسترده‌ای توسط دانشگاه و صنعت برای تخمین دقیق این ولتاژها و جریان‌ها و طراحی طرح‌های حفاظتی در برابر چنین اختلالاتی انجام شده است؛ در ادامه می‌توان گفت که 2LVSC و 3LVSC به طور گسترده برای رویکردهای کنترل مستقیم مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

مرجع (Baranwal, Basu & Mohan, 2015) یک روش مبدل 2LVSC و ماتریس دوگانه را بر اساس سیم‌پیچ‌های انتهایی باز کنترل‌شده با PWM پیشنهاد می‌کند که نویسندگان روش پیشنهادی را با استفاده از یک نمونه تجربی تایید کردند.

در (Kucka, 2019)، qsi-2LVSC با PWM با MC و 2LVSC مقایسه شد. به گفته نویسندگان، در این مطالعه، ریبیل جریان افزایش یافته است که در ولتاژ متوسط درست می‌باشد. بنابراین، qsi-2LVSC با PWM برای کاربردهای کم سرعت و ولتاژ متوسط مناسب است. یکی از ویژگی‌های خاص استراتژی‌های مورد مطالعه این بود که فرآیند اصلاح باید در پرتو طراحی کنترل تحلیل شود. در نتیجه، هر زمان که توپولوژی متفاوتی اجرا شود؛ اصلاحات باید مطابق با توپولوژی درایور جدید تحلیل شوند. DTFC اساساً مبتنی بر کنترل مستقیم دامنه شار روتور و گشتاور روتور DFIM است که بر اساس نوسانات گشتاور زیاد و خطای بحرانی یکسوکنده متصل به روتور استاندارد، روش پیشنهادی در (Maciejewski & Iwanski, 2020) اصلاح می‌شود. مرجع (Hosseini & Rezvani, 2020) یک استراتژی جدید با در نظر گرفتن SVM در 2LVSC برای VSPSP معرفی می‌کند که منجر به کاهش امواج قدرت فعال و راکتیو استاتور می‌شود و یک رویکرد برداری متصل جدید به مبدل جانبی روتور PSP در (Bidgoli, Mohammadpour & Bathaee, 2015) توضیح می‌دهد و پمپ و توربین برای ۳۸۱ مگاوات PSP با استفاده از تئوری لیاپانوف در هر دو حالت شبیه‌سازی می‌شوند.

از دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، ماشین‌های سرعت متغیر به‌جای نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای (PSP) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. امروزه استفاده از PSP با سرعت متغیر (VSPSP) با توجه به سرعت و کارایی بالا برای بازیابی و مصرف انرژی بسیار مهم است (Schwery, al. 1993, Herzog, Fass et al. 2005, Furuya, Taguchi et al. 2006). درایورهای مدرن¹ DFAM با مبدل‌های منبع ولتاژ دو و سه‌سطح تغذیه (2LVSC و 3LVSC) در حال حاضر در نظر گرفته می‌شوند. طرح کنترل مستقیم گشتاور و شار (DTFC) یک رویکرد جدید برای کنترل درایورهای مدرن است. در (Schmidt, Kemmetmüller & Kugi, 2017)، اثرات دینامیکی چکش آب به طور دقیق برای VSPSPها شرح داده شد و بهینه‌سازی مدل حرارتی پیشنهادی با توجه به محدودیت‌ها، تلفات کل را کاهش داد. مرجع (Zhang, Zhu et al. 2012) حسگر تلفات یک اینورتر 3LVSC-ANPC را برای یک موتور القایی توصیف می‌کند که با کنترل گشتاور مستقیم (DTC)، کنترل منطق فازی و ناظر شار تطبیقی با سرعت کنترل شد که منجر به بهبود عملکرد سیستم می‌شود. مرجع (Han, Kim et al. 2013) روشی را برای تولید سیگنال‌های مرجع شار روتور برای ماشین‌های القایی با تغذیه دوبل (DFIM) با توربین‌های بادی مورد بحث قرار داد. بنابراین، اینورتر در روتور در یک ژنراتور القایی بادی دوگانه (DFIG) توسط سیم‌پیچ‌های استاتور تغذیه می‌شود. علاوه بر این، نتایج تجربی برای ۲/۴ کیلووات DFIG مورد استفاده قرار گرفت.

یک روش کنترل مدرن برای یک شبکه متصل به ماشین‌های آسنکرون با تغذیه دوگانه که توسط نیروگاه‌های بادی تغذیه می‌شوند در (Yamasu & Wu, 2014) پیشنهاد شد. مبدل پیشنهادی تقویت‌کننده سه‌سطحی سمت شبکه (یکسوکنده دیودی و 3LVSC-NPC سمت ماشین سنکرون یا PMSG) در توربین‌های بادی است و یک روش پیش‌بینی برای کنترل کل سیستم ارائه می‌شود که در نتیجه تغییر حالت به حداقل می‌رسد. یک استراتژی کنترلی در (Phan & Lee, 2011) پیشنهاد شد که به طور موثر هارمونیک پنجم و هفتم ولتاژ خروجی استاتور را حذف می‌کند که تنظیم سرعت متغیر به عنوان سودمندترین جنبه روش پیشنهادی در نظر گرفته شد. به علاوه، این مطالعه، یک نمونه آزمایشی را برای تغذیه یک بار غیرخطی با ۲/۲ کیلووات DFIG توصیف می‌کند. کنترل بدون حسگر گشتاور مستقیم دوگانه DFIM در (Abdellatif & Debbou, 2014) معرفی می‌شود که موقعیت روتور با استفاده از یک اتصال 2LVSC به روتور و استاتور یک DFIM و یک سنسور سرعت تجزیه و تحلیل می‌شود که در نهایت، یک نمونه آزمایشی برای اعتبارسنجی کل سیستم به کار گرفته می‌شود. به طور مشابه، یک مبدل ۱/۵ کیلووات امپر با استفاده از کنترل توان مستقیم در (Jia-bing, 2012) تجزیه و تحلیل می‌شود. که مشکلات

¹Doubly FED Asynchronous Machin

القایی با مبدل ۶ پالسی، ۶) ماشین‌های القایی با مبدل ۱۲ پالسی، ۷) ماشین‌های القایی با مبدل PWM، ۸) ماشین‌های القایی با تغذیه دابل بدون جاروبک، ۹) ماشین‌های القایی روتور سیم‌پیچی‌شده با سیکلوکانورتر و ۱۰) ماشین‌های القایی با روتور سیم‌پیچی‌شده با مبدل منبع ولتاژ. با توجه به (Semsar, Hosseini & Afjei, 2013)، سه روش اصلی مورد استفاده در نیروگاه‌های برقی‌آبی شامل: ماشین‌های سنکرون با کموتاسیون خط ۱۲ پالس، DFAM با روتور سیم‌پیچی‌شده با سیکلوکانورتر و DFAM با مبدل منبع ولتاژ است. نویسندگان یک روش کنترل بهبودیافته برای DFAM با مبدل منبع ولتاژ ارائه کردند. روش ارائه‌شده در (Hosseini & Semsar, 2016) واحد ۲۵۰ مگاواتی نیروگاه سیاه‌بیشه را به عنوان مطالعه موردی ارزیابی کرد. درایور اعمال‌شده در یک مبدل سمت ماشین در مود تولید شبیه‌سازی شد. علاوه بر این، خروجی‌های درایور پیشنهادی با هم مقایسه شدند و تمام نتایج شبیه‌سازی با استفاده از یک نیروگاه بادی ۲/۲ کیلووات اعتبارسنجی شد که در آن مبدل‌های پیشنهادی 2LVSC و 3LVSC-NPC با روش کنترل گشتاور و شار مستقیم (DTFC) بودند.

در مقاله حاضر ابتدا، مدل هیدرولیک VSPSP مورد بحث قرار می‌گیرد و سپس مدل الکتریکی VSPSP با درایورهای جدید کاربردی را معرفی می‌کند. روش سوئیچینگ و کنترل درایورها برای واحد ۲۵۰ مگاواتی نیروگاه سیاه‌بیشه به عنوان مطالعه موردی ارائه خواهد شد. پس از آن، درایور جدید با (6+1) 2LVSC برای VSPSP ارائه خواهد شد. این توپولوژی مدرن با ۶+۱ کانورتر بر اساس رویکرد DTFC سازماندهی شده است در نهایت ضمن بیان مدل حرارتی جدید، نتایج حرارتی و میزان تلفات آنها تحلیل خواهد شد و در ادامه، کل فرآیند مذکور با نتایج شبیه‌سازی یک نمونه ۲/۲ KW از VSWP مقایسه و اعتبارسنجی خواهد شد و در نهایت، تمام سناریوی مذکور در نرم‌افزار PLEXIM/block set تحت MATLAB شبیه‌سازی و اعتبارسنجی خواهد.

۲- مدل هیدرولیک VSPSP

در این قسمت، مدل هیدرولیکی این نیروگاه ارائه می‌شود. اینرسی آب، تراکم‌پذیری آب و کشش یا الاستیسیته دیواره مجرای آب در پنستاک همگی بر کارایی توربین تاثیر می‌گذارند. با توجه به حجم آب جاری غیرالاستیک در پنستاک، معادلات اساسی برای سرعت آب در پنستاک، شتاب آب در اثر گرانش و توان خروجی توربین به شرح زیر است:

$$(H_0 - H - H_f) \rho g A = \rho A l \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

$$H_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{U^2}{2g} = f_p \times Q^2 \quad (2)$$

$$f_p = \frac{L}{D} \times \frac{f}{2g} \times \frac{1}{A^2} \quad (3)$$

در معادلات اصلی بالا، H_0 نشان‌دهنده هد استاتیک آب، H نشان‌دهنده هد آب در ورودی توربین و H_f از دست‌دادن هد به دلیل اصطحکاک است. ضریب اصطحکاک و ضریب افت هد به ترتیب f_p و f

در (Bidgoli & Bathae, 2015)، یک کنترل‌کننده برای پاسخ گذرا خطا با جبران پویا سریع فرض شد که روش فرضی ولتاژ پایانه را برای اغتشاشات حذف‌شده و عدم قطعیت در فرکانس پایین کاهش می‌دهد.

خطای دینامیکی PSP هند (نیروگاه ۲۵۰ مگاوات، تهری) در مورد اتصال به شبکه و ترمز تولید در (Joseph & Selvaraj et al. 2017) تجزیه و تحلیل شد. تجزیه و تحلیل با استفاده از راه اندازی ۲/۲ کیلووات تایید شد. این مطالعه به موازات یک مبدل 3LVSC-NPC با استفاده از روش PWM با پنج مبدل ۵ مگاواتی است. در راستای همان طرح، (Joseph & Raj Chelliah, 2017) عملکرد، مدارهای حفاظتی و مزایای اقتصادی PSP مذکور را بررسی کرد. عملکرد دینامیکی نهایی PSP در (Joseph & Desingu et al. 2017) در برابر خطاهای مدارهای قدرت و کنترل حالت پمپ و همچنین شرایط سرعت زیر سنکرون و فوق سنکرون ارائه شد که این روش با استفاده از یک نمونه ۲/۲ کیلووات اعتبارسنجی شد. مرجع (Joseph & RajChelliah et al. 2018) تشخیص و کنترل عیب PSP، ۲۵۰ مگاواتی را توضیح می‌دهد که در آن 3LVSC-NPC با رویکرد PWM سوئیچ می‌شود و در آن پنج مبدل ۵ مگاواتی با هم موازی هستند. در (Jiao & Lee, 2015)، SVM برای 3LVSC-ANPC (۲۰۰ کیلووات) اجرا شد که تنش الکتریکی و تلفات مبدل پیشنهادی را کاهش داد. در نهایت، روش مذکور با استفاده از نمونه آزمایشی تایید شد. بر اساس SVM، 3LVSC-ANPC (۲۵ کیلووات) در (Katebi, He & Weise, 2017) معرفی شد. به این ترتیب، تلفات حرارتی و عملیات بحرانی کاهش یافت در مبدل پیشنهادی از سوئیچ‌های ماسفت استفاده شد.

PSP با روش 3LVSC-ANPC و PWM در (Xia, Liu & Gyerrero, 2020) مورد بحث قرار گرفت. از طریق سوئیچینگ MO2 پیشنهادی، تلفات مبدل بر اساس پارامترهای تلفات نامتعادل به تابع هزینه اضافه شد که منجر به کاهش تلفات نامتعادل شد. در (Desingu, Selvaraj et al. 2020)، یک روش کنترل حرارتی فعال، انطباق نوسانات حرارتی مبدل (3LVSC-NPC 5*5 - مگاوات) را مشخص می‌کند که در نهایت با استفاده از رویکرد PWM سوئیچ می‌شود. تلفات توان و حرارت در RSC‌های متصل به DFIM کاهش یافت و نتایج به صورت تجربی تایید شد. مرجع (Dodge, 2020) 3LVSC-NPC و 3LVSC-ANPC را با سوئیچ‌های FET و روش PWM توصیف می‌کند. این مطالعه NPC را به ANPC تبدیل کرد که بر اساس آن میزان فرکانس خروجی را افزایش، تلفات توان را کاهش و مقاومت‌های متعادل را حذف می‌کند. علاوه بر این، محاسبه تلفات توان حالت پایدار برای انتخاب روش مبدل و مدولاسیون و انتخاب کمیت سوئیچ سودمند بود. (Hosseini, Semsar & Aghasi, 2012) بیان می‌کند که طراحی و ساخت درایوهای جدید در VSPSP به طور قابل توجهی بهبود یافت. این مطالعه بیش از ۱۰ روش درایو متمایز را معرفی کرد؛ از جمله: (۱) ژنراتورهای قطب قابل جابجایی، (۲) ماشین‌های آبشاری، (۳) گیربکس، (۴) ماشین‌های سنکرون کموتاسیون خط ۱۲ پالسی، (۵) ماشین‌های

می‌شود. خودالقایی روتور و استاتور با استفاده از معادلات زیر تعیین می‌شود:

$$L_s = L_{\sigma s} + L_h \quad (18)$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_h \quad (19)$$

که در آن $L_{\sigma s}$ و $L_{\sigma r}$ اندوکتانس‌های نشتی استاتور و روتور هستند.

۴- معرفی درایور VSPSP

درایور DFAM به‌کارگرفته‌شده در VSPSP از نوع MVSC چندسطحی با توجه به مزایای بسیار این مبدل، مانند: سرعت درایو بسیار سریع، سوئیچینگ فرکانس بالا و عملکرد بدون وقفه در اتصال کوتاه است. در این مقاله، درایور کاربردی VSPSP همراه با 2LVSC، در شکل ۲ نشان داده شده است.

۴-۱- روش سوئیچینگ و کنترل درایور پیشنهادی VSPSP

مدولاسیون به‌کارگرفته‌شده در این مقاله، DTFC است؛ زیرا می‌تواند زوایای آتش مبدل تعیین‌شده توسط موقعیت شار روتور را کنترل کند. علاوه بر این، می‌تواند زاویه شار را بر اساس فرکانس مرجع تولید کند. این روش با معادلات زیر مدل‌سازی شده است:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \cdot p \cdot \text{Im}\{\bar{\Psi}_{Fxs} \cdot \bar{i}_r^*\} \quad (20)$$

$$\bar{v}_r^* = R_r \bar{i}_r^* + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_{Fxr} \quad (21)$$

بر این اساس، T_{em} گشتاور الکترومکانیکی است و $\bar{\Psi}_{Fxr}$ و $\bar{\Psi}_{Fxs}$ به ترتیب شارهای استاتور و روتور هستند. ولتاژ روتور و R_r و \bar{i}_r^* به ترتیب مقاومت و جریان روتور هستند. بردارهای شار ناشی از جدول سوئیچینگ درایور VSPSP با 2LVSC با توجه به موقعیت شار روتور و استاتور در فواصل ۶۰ درجه (مطابق با 2LVSC در شکل ۲) در هر دو جهت عقربه‌های ساعت و خلاف جهت عقربه‌های ساعت است که در (Hosseini & Semsar, 2016) در مود تولید ارائه شد و جدول سوئیچینگ این درایور نیز به طور مشابه در (Hosseini & Semsar, 2016) بیان شده است.

در صورت استفاده از درایور جدید پیشنهادی این مقاله، شار روتور با همان زاویای ۶۰ درجه بر حسب موقعیت روتور و استاتور تولید می‌شود که توسط این درایور با 2LVSC شکل ۲، تعداد سکتورها برای موقعیت شار در این درایور نیز به ۶ عدد می‌رسد.

سوئیچ کاربردی در تمام درایورهای مذکور از نوع IGBT است. جدول ۱ بیانگر بردارهای تزریقی شار و یا سوئیچینگ درایور پیشنهادی را توضیح می‌دهد. بنابراین، بردارهای شار مزبور می‌تواند بر اساس سکتورها و خطاهای گشتاور و شار ($e|\bar{\Psi}_r|$ و eT_{em}) و بر مبنای روش DTFC تولید و به سوئیچ‌های کاربردی در درایور پیشنهادی با کانورتر شکل ۲ تزریق شوند. دلیل تمایز ساختار درایور جدید با دایورهای قبلی، تفاوت در تعداد کانورتر شکل ۲ می‌باشد که به ۷ کانورتر افزایش

هستند. علاوه بر این، L_s و D و U به ترتیب نشان‌دهنده طول مجرا، پستاک و سرعت آب داخل آن هستند.

$$T_w = \frac{LQ_{base}}{H_{base}gA} \times \frac{LU_{base}}{H_{base}g} \quad (4)$$

T_w و U_{base} به ترتیب ثابت اینرسی آب و سرعت پایه آب در پستاک هستند که در بالا بیان شد. معادله قدرت مکانیکی توربین در حالت پایدار به شرح زیر است:

$$P_m = \eta Q \rho g H \quad (5)$$

که در آن P_m ، η و Q به ترتیب توان خروجی، بازده و جریان واقعی توربین هستند. ρ چگالی آب و H ارتفاع آب در ورودی توربین است.

$$P_m = A_t H (Q - Q_{nl}) - D_n G \Delta \omega \quad (6)$$

$$A_t = \frac{1}{G_{fl} - G_{nl}} * \frac{\text{Turbine MW rating}}{\text{Generator MW rating}} \quad (7)$$

$$Q = G \sqrt{H} \quad (8)$$

از آنجایی که راندمان توربین هرگز ۱۰۰ درصد نیست؛ جریان بارگذاری شده Q_{nl} توربین باید از جریان اصلی کم شود تا جریان موثری که نیروی مکانیکی تولید می‌کند؛ به دست آید. D_n ضریب میرایی توربین و A_t ضریب بهره توربین است. نرخ جریان توربین (Q) در آخرین معادله بالا معرفی شده است.

۳- مدل الکتریکی VSPSP

مدل الکتریکی DFAM اتخاذشده در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است (Bimal, 2020).

$$v_{sa}(t) = R_s \cdot i_{sa}(t) + \frac{d\Psi_{sa}(t)}{dt} \quad (9)$$

$$v_{sb}(t) = R_s \cdot i_{sb}(t) + \frac{d\Psi_{sb}(t)}{dt} \quad (10)$$

$$v_{sc}(t) = R_s \cdot i_{sc}(t) + \frac{d\Psi_{sc}(t)}{dt} \quad (11)$$

که در آن $i_{sa}(t)$ ، $i_{sb}(t)$ و $i_{sc}(t)$ به ترتیب جریان‌های استاتور در فازهای a، b و c هستند. $v_{sa}(t)$ ، $v_{sb}(t)$ و $v_{sc}(t)$ ولتاژهای فاز استاتور هستند در حالی که $\Psi_{sa}(t)$ ، $\Psi_{sb}(t)$ و $\Psi_{sc}(t)$ نشان‌دهنده شار استاتور هستند. R_s مقاومت سیم‌پیچ استاتور است. به منظور آسان‌تر کردن تحلیل معادلات ماشین، روش کلی این است که تمام معادلات را به چارچوب مرجع استاتور که با سرعت سنکرون ω_s در حال چرخش است؛ منتقل کنیم. بنابراین، با فرض سرعت الکتریکی روتور ماشین به عنوان ω_m ، معادلات مربوطه را می‌توان در زیر ارائه داد:

$$\bar{v}_s^a = R_s \bar{i}_s^a + \frac{d\bar{\Psi}_s^a}{dt} + j \omega_s \bar{\Psi}_s^a \quad (12)$$

$$\bar{v}_r^a = R_r \bar{i}_r^a + \frac{d\bar{\Psi}_r^a}{dt} + j(\omega_s - \omega_m) \bar{\Psi}_r^a \quad (13)$$

$$\bar{\Psi}_s^a = L_s \bar{i}_s^a + L_h \bar{i}_r^a \quad (14)$$

$$\bar{\Psi}_r^a = L_h \bar{i}_s^a + L_r \bar{i}_r^a \quad (15)$$

$$\bar{\Psi}_s^s = L_s \bar{i}_s^s + L_h \bar{i}_r^s = L_s \bar{i}_s^s + L_h e^{j0} m \bar{i}_r^s \quad (16)$$

$$\bar{\Psi}_r^r = L_r \bar{i}_r^r + L_h \bar{i}_s^r = L_h e^{-j0} m \bar{i}_s^r + L_r \bar{i}_r^r \quad (17)$$

که در آن L_s و L_r به ترتیب خودالقایی استاتور و روتور هستند. اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور با L_h نشان داده

برای ایجاد پالس کانورت فرامی‌آورند. برای کنترل اندازه شار و گشتاور در ساختار DCCU از دو مقایسه‌کننده هیستریزس، سه سطحی و دوسطحی استفاده می‌گردد. ورودی این مقایسه‌گرها، خطاهای مذکور است و از خروجی آن‌ها برای انتخاب نحوه کلیدزنی استفاده می‌گردد. چگونگی عملکرد این مقایسه‌گرها با در نظر گرفتن موقعیت شار روتور برای کنترل کانورت، جهت تولید بردار ولتاژ مناسب در حالات گوناگون مطابق جدول سوئیچینگ ۱ آورده شده است. باید توجه داشت که این مقایسه‌گرها در قسمت گشتاور از سه سطح ۱، ۰ و -۱ و در قسمت شار از دو سطح ۱ و -۱ تشکیل شده است. در قسمت گشتاور سطح ۱ مبین حرکت در حالت بالاتر از سرعت سنکرون (Hyper Synchronous) و سطح -۱، حرکت در حالت پایین‌تر از سرعت سنکرون (Sub Synchronous) را بیان می‌دارد و سطح صفر جهت کاهش ریبیل گشتاور می‌باشد.

جدول ۱: جدول سوئیچینگ مبدل روتور دوسطحی (2LVSC (6+1))

eT_{em}	1		-1	
	1	-1	1	-1
$E \overline{\Psi}_r $	V_6	V_5	V_2	V_3
موقعیت شار روتور (سکتورها)	1	V_6	V_5	V_2
	2	V_1	V_6	V_3
	3	V_2	V_1	V_4
	4	V_3	V_2	V_5
	5	V_4	V_3	V_6
	6	V_5	V_4	V_1

جدول ۲ به‌طور خلاصه مقایسه فنی و اقتصادی و ارزیابی محرک‌های ذکر شده را نشان می‌دهد؛ بررسی دیتاهای جدول حاکی از آن است که درایور با 2LVSC به دلیل کاربرد تنها یک کانورت ۲۴ مگاوات دارای پایین‌ترین قابلیت اطمینان و بیشترین هزینه نگهداری و بهره‌برداری (O&M) در بین سایر کانورت‌هاست. در همین راستا، کاربرد VSPSP با درایور نوین پیشنهادی با (6+1) 2LVSC و ۷ کانورت ۴ مگاوات، علیرغم هزینه اولیه (هزینه تجهیزات مدرن کاربردی) بیشتر نسبت به درایور با 2LVSC به دلیل کاربرد کانورت‌های هات‌پلاگ یا قلیل جایگزین با نمونه مشعلیه، فولید تعمیر و نگهداری سریع و آسان، افزایش قابلیت اطمینان، هزینه O&M کم و به تبع آن $MTBF^4$ بالاتر حاصل می‌شود که می‌تواند معایب درایور با 2LVSC را در VSPSP پوشش دهد و لذا، نسبت به سایر مبدل‌های دیگر توصیه و تأکید می‌شود که نتایج حاصل از بررسی‌ها در قسمت شبیه‌سازی بیان و با کمک مقایسه با نتایج شبیه‌سازی یک نمونه بادی تحلیل و اعتبارسنجی خواهد شد.

۵- مدل حرارتی برای درایور با (6+1) 2LVSC

تلفات انرژی حرارتی درایورها به دلیل افزایش دمای کلیدهای فعال درایورها و شارش جریان حرارتی از نقاط اتصال (junction) به بدنه

یافته است و منجر به افزایش قابلیت اطمینان از عملکرد درایور می‌شود و سرعت تعمیر و نگهداری از تجهیزات را بهبود می‌بخشد.

۴-۲- معرفی توپولوژی پیشنهادی درایور VSPSP

با توجه به استانداردهای کاربردی BICSI و TIA942 برای طراحی دیتاسنترها و طبقه‌بندی Tear3 زیرساخت‌های برق ذکر شده (ANSI/BICSI, 2019) در آنها، می‌توان مبدل ۲۴ مگاواتی اعمال شده در این VSPSP را به شش مبدل موازی فعال با ظرفیت ۴ مگاوات (۶ کانورت*۴ مگاوات) تقسیم کرد (ANSI/TIA942, 2017) و به صورت N+1، آرایش داد که در آن N تعداد مبدل‌هایی با کمترین ظرفیت را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه، در این مقاله، کوچکترین ظرفیت کانورت کاربردی ۴ مگاوات و N برابر با ۶ است. به عبارت دیگر، شش کانورت موازی به طور همزمان فعال با ظرفیت ۴ مگاوات و یک کانورت آماده به‌کار (standby) و یا افزونه^۲ ۴ مگاوات که بر اساس مدولاسیون DTFC فعال می‌باشند؛ ایجاد می‌شود. اعتبارسنجی درایور مذکور از تقسیم یک مبدل نمونه ۱۲۰۰ وات که به شش مبدل موازی ۲۰۰ وات همراه با یک مبدل مشابه افزونه ۲۰۰ وات در VSWP انجام می‌شود (۶ کانورت*۲۰۰ وات) که بر اساس DTFC فعال می‌باشد و با آرایش ۶+۱ با یکدیگر اتصال دارند؛ بنابراین، ما می‌توانیم با توپولوژی جدید پیشنهادی کاربرد کانورت با آرایش ارتباطی ۶+۱، درایورهای جدید ایجاد کنیم که در نمودار بلوکی شکل ۳ ارائه شده است که در آنها ۷ کانورت موازی نشان داده شده است و هفتمین کانورت، همان کانورت آماده به‌کار و یا افزونه، است که در صورت نیاز و یا معیوب شدن هر کدام از ۶ کانورت فعال، می‌تواند در سریعترین زمان ممکن توسط اپراتور بهره‌بردار، کانورت معیوب به صورت اتصال داغ (Hot Plug) جایگزین نمونه سالم مشعلیه آن گردد؛ بدون آنکه در عملکرد سیستم در زمان طولانی مدت و در نهایت تولید مبدل اصلی و VSPSP اختلال ایجاد شود.

درایورهای کاربردی در این بخش از ۲ قسمت ذیل، تشکیل شده‌اند:

۱. واحد کنترل مرکزی درایور (DCCU)؛

۲. کانورت‌های با آرایش ارتباطی ۶+۱؛

DCCU شامل ۵ قسمت کاربردی به شرح ذیل است:

۱. Estimation؛ ۲. فیلتر مقایسه‌کننده هیستریزس ۳ سطحی گشتاور؛ ۳. فیلتر مقایسه‌کننده هیستریزس ۲ سطحی شار؛ ۴. Vector Selection؛ ۵. Pulse Generation.

فرآیند اجرائی این درایورها به این صورت است که بر حسب مدولاسیون DTFC، شار روتور و گشتاور با توجه به جریان استاتور و روتور و روابط (20) و (21) محاسبه می‌شود و با توجه و مقایسه با مقدار مرجع آنها با کمک فیلترهای مقایسه‌کننده هیستریزس یا کنترل‌کننده‌های پهنای باند^۳ در گشتاور⁺ T_{em} و شار⁺ $|\overline{\Psi}_r|$ و تولید خطاهای گشتاور eT_{em} و اندازه شار⁺ $e|\overline{\Psi}_r|$ امکان تولید بردار ولتاژ را

⁴Mean Time to Between Failure

²redundant

³HysteresisBand

جدول ۲: مقایسه و ارزیابی فنی و اقتصادی توپولوژی پیشنهادی

دراپورها

نوع درایور	راندمان %	تلفات %	هزینه اولیه %	قابلیت اطمینان	هزینه O & M	مزایای اضافی
2LVSC	۸۰	۲۵	۱۰۰	پایین	زیاد	سوئیچینگ در فرکانس بالا
2LVSC (6+1)	۸۰	۲۵	۱۱۶	بالا	کم	تعمیر و نگهداری سریع و آسان

ترتیب نتایج شبیه‌سازی درایور با 2LVSC (5+1) را در VSPSP ۲۵۰ مگاوات و تأیید آن در ۲/۲ کیلووات با توپولوژی جدید پیشنهادی ۶+۱ را نشان می‌دهند که بر اساس نمودارهای گشتاور روتور (Tr)، شار (phr)، مشخصات سوئیچ، مشخصات تلفات سوئیچ‌های یکی از کانورترها از ۷ کانورتر موجود و تلفات کل VSPSP برای هر ۲ درایور از بالا به پایین در هر ۲ شکل مذکور، نشان داده شده

جدول ۳: مشخصات مکانیکی و هیدرولیکی VSPSP

توان خروجی اسمی توربین (MW)	سرعت اسمی (rpm)	هد (m)	جریان آب (m ³ /S)	جریان آب بدون بار (m ³ /S)
260.35	500	476.17	59.49	8

جدول ۴: ویژگی‌های DFAM در VSPSP

مقاومت روتور (pu)	راکتانس روتور (pu)	مقاومت استاتور (pu)	راکتانس استاتور (pu)	واکنش متقابل (pu)
0.01393	0.1	0.01453	0.101	0.5
توان ظاهری (MVA)	قدرت فعال (MW)	ولتاژ استاتور (KV)	ولتاژ روتور (KV)	جفت قطب
306	250	18	2	6

جدول ۵: ویژگی‌های DFAM در VSWP

مقاومت روتور (pu)	راکتانس روتور (pu)	مقاومت استاتور (pu)	راکتانس استاتور (pu)	واکنش متقابل (pu)
0.56	0.052953	2.14	0.052953	0.04847
قدرت نامی (KW)	ولتاژ استاتور (V)	ولتاژ روتور (V)	جفت قطب	
2/2	440	40	6	

است و در آنها سرعت متغیر ۰/۸ ثانیه است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی این ۲ درایور با هم نشان می‌دهد که پس از تغییر سرعت، مدت زمان تغییرات گشتاور، شار، کمتر از ۰/۱ ثانیه است و قسمت‌های حرارتی طبق پارامترهای موجود در جدول ۶ شبیه‌سازی شده است که در شکل‌های ۵و۶ به ترتیب، حداکثر پیک تلفات هدایت سوئیچ اول، ۳۴۹۲۸/۲۱ وات و ۰/۰۰۰۳۸۱۹ وات و حداکثر تلفات سوئیچینگ ۰/۰۰۹۵۳۶ ژول و ۰/۰۰۰۶ * ۲/۶ ژول می‌باشد و حداکثر دمای ثابت یک هیت‌سینک ۷۵/۲۵ و ۲۵/۰۰۰۳ درجه سلیسیوس است و نیز متوسط

(case) و از آن به هیت‌سینک و محیط بیرونی درایورها است. در چنین تجهیزاتی الکترونیکی قدرتی، فرآیند خنک‌سازی از طریق هیت‌سینک انجام می‌شود. بنابراین، در این مقاله مدل‌سازی تلفات و مقاومت‌های جریان حرارتی بر اساس تجهیزات سوئیچینگ بکارگرفته‌شده انجام می‌شود. در میان سایر درایورها، مدل درایور 2LVSC (6+1) در قسمت شبیه‌سازی توضیح داده شده است. مدل‌های تلفات حرارتی درایورهای پیشنهادی در معادلات زیر توضیح داده شده است:

$$P_{sw} = (E_{on} + E_{off}) * f_{sw} \quad (22)$$

$$P_{loss} = P_{sw} + P_{on\ state} \quad (23)$$

که در آن P_{loss} کل تلفات در هر سوئیچ است؛ P_{sw} تلفات سوئیچینگ در فرکانس سوئیچینگ f_{sw} و $P_{on\ state}$ (حالت روشن) تلفات سوئیچ در حالت روشن است. علاوه بر این، E_{off} و E_{on} به ترتیب سطوح انرژی سوئیچ در حالت‌های روشن و خاموش هستند.

$$Z_{th(j-c)}(t) = \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (24)$$

R_i نشان‌دهنده مقاومت‌های حرارتی در مسیر شار حرارتی است و $Z_{th(j-c)}$ برهم نهی این مقاومت‌ها است و τ_i ثابت زمانی حرارتی است که نوسانات دما و تغییرات دینامیکی در دمای نیمه هادی را نشان می‌دهد. یک نمودار شماتیک از مدل حرارتی درایو مبدل VSPSP با یک (6+1) 2LVSC در شکل ۴ ارائه شده است که در آن t_c ، t_j ، t_a و t_h به ترتیب دما در نقطه اتصال، دما در نقطه بدنه نیمه‌هادی، دما در نقطه هیت‌سینک و محیط بیرون یا محیط سوئیچ هستند. $R_{th(j-c)}$ نشان‌دهنده مقاومت حرارتی یک کلید از شش سوئیچ در هر کانورتر ۴ مگاوات در VSPSP و ۲۰۰ وات در VSWP است که بین نقطه اتصال به بدنه و $R_{th(c-h)}$ و $R_{th(h-a)}$ به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت حرارتی بدنه به هیت‌سینک و مقاومت حرارتی هیت‌سینک به محیط بیرون است. نتایج شبیه‌سازی حرارتی در VSPSP ۲۵۰ مگاوات و تأیید آن توسط VSWP ۲/۲ کیلو وات در قسمت ۶، این مقاله آمده است.

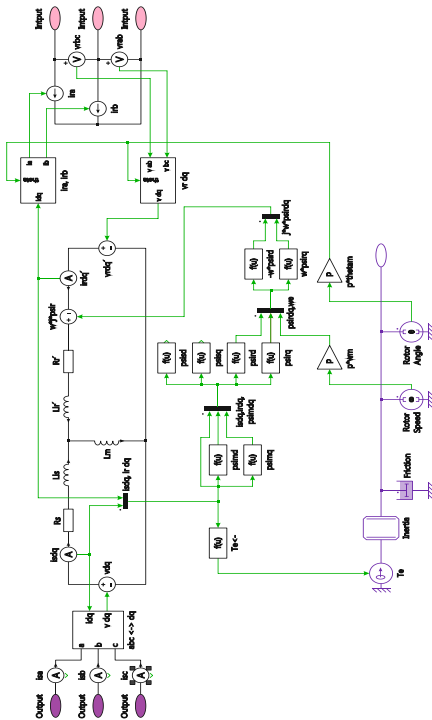
۶- نتایج شبیه‌سازی (مطالعه موردی)

نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای سیاه‌بیشه در شمال ایران، بین کرج و چالوس و در مجاورت روستای سیاه‌بیشه قرار دارد که به نام این نیروگاه، نامگذاری شده است. این تأسیسات، دارای چهار واحد سنکرون ۲۵۰ مگاواتی است. این مطالعه با فرض اینکه یکی از واحدها DFAM است و تاثیر درایورهای جدید بر عملکرد واحد مورد نظر بررسی می‌شود؛ انجام شده است. تجزیه و تحلیل‌های نهایی با مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری درایورهای قبل تاکنون انجام می‌شود. پارامترهای هر سیستم در جداول ۴، ۳ و ۵ ارائه شده است. سوئیچ‌های استفاده‌شده توسط درایورهای VSPSP از نوع IGBT با مشخصات ولتاژ اسمی ۴۵۰ ولت، جریان اسمی ۳۰۰۰ آمپر و محدوده دمای ۲۵ تا ۱۲۵ سلیسیوس هستند و در VSWP از نوع IGBT با مشخصات ولتاژ اسمی ۱۷۰۰ ولت، جریان اسمی ۸۰۰ آمپر و محدوده دمای ۲۵ تا ۱۲۵ سلیسیوس هستند. شکل‌های ۵ و ۶ به

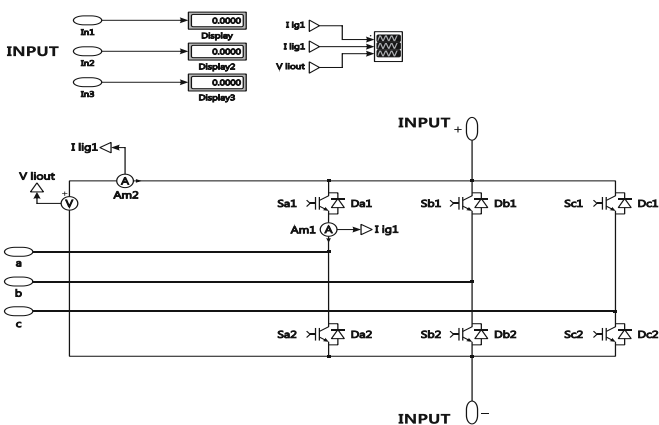
جدول ۶: مشخصات مدل حرارتی در VSPSP و VSWP

t_a (°C)	t_j (°C)	نوع نیروگاه	$R_{thj-c}(IGBT)$ ($\frac{K}{W}$)	$R_{thj-c}(Diode)$ ($\frac{K}{W}$)	$R_{thc-h}(IGBT)$ ($\frac{K}{W}$)	$R_{thc-h}(Diode)$ ($\frac{K}{W}$)	R_{thh-a} ($\frac{K}{W}$)
125	25	VSPSP	0.0032	0.0061	0.0007	0.0015	0.001183
		VSWP	0.021	0.036	0.024	0.048	3.835641

۵. در نهایت تمامی موارد مذکور با کمک مقایسه نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته با یک نمونه VSWP ۲/۲ کیلووات، راستی‌آزمایی و تأیید شدند.



شکل (۱): مدل الکتریکی DFAM در VSPSP



شکل (۲): مدار 2LVSC در VSPSP

دمای نقطه اتصال IGBT در کل سیکل (duty cycle)، ۴۵ و ۲۵/۰۰۰۱ درجه سلیسیوس می‌باشد که نشان از عملکرد بسیار مناسب هیت‌سینک‌های کاربردی برای کانورترهای درایور است؛ طبق همین شکل‌ها، مجموع تلفات حرارتی برای یکی از شش کانورتر فعال یک درایور 2LVSC (6+1) ۱۳۷۰۱/۲۳ وات و ۰/۲۴۷۸ وات است و همان‌طور که انتظار می‌رفت؛ نتایج درایور کاربردی با 2LVSC (6+1) در VSPSP ۲۵۰ مگاوات توسط نمونه مشابه کاربردی در VSWP با ظرفیت ۲/۲ کیلووات، تأیید و اعتبارسنجی شده است.

۶- نتیجه‌گیری

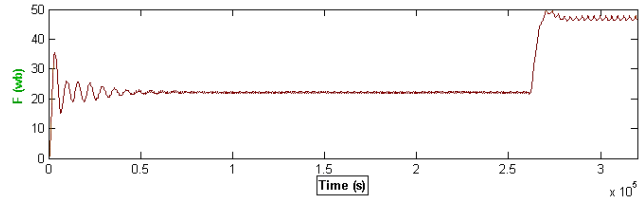
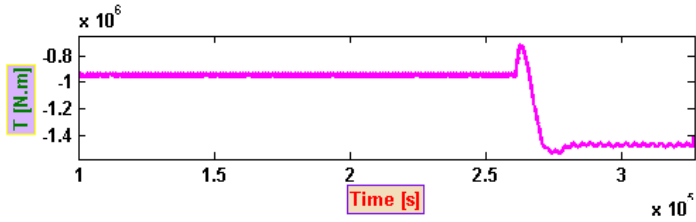
این مطالعه یک توپولوژی مدرن برای درایو VSPSP ۲۵۰ مگاوات در یک واحد از نیروگاه سیاه‌بیشه ارائه کرد. نتایج را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

۱. استفاده از درایور نوین پیشنهادی با 2LVSC (6+1) به سبب افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه O&M نسبت به کاربرد درایور با 2LVSC علیرغم افزایش بسیار بالای هزینه اولیه آن در VSPSP قابل توجیه است؛
۲. به منظور افزایش طول عمر، انجام نگهداری سریع‌تر و آسان‌تر و $MTBF^5$ بالاتر درایورها، توپولوژی کاربرد آنها با (6+1) کانورتر به صورت هات پلاگ، پیشنهاد شد که در صورت استفاده از درایور با 2LVSC (6+1) در VSPSP، محقق می‌شود؛
۳. همچنین در تمامی درایورها، تغییرات در کمتر از ۰/۱ ثانیه، قابل مشاهده است و تمامی سوئیچ‌های IGBT مورد استفاده در درایورهای معرفی شده این مقاله بر اساس مدولاسیون DTFC، فعال می‌باشند؛

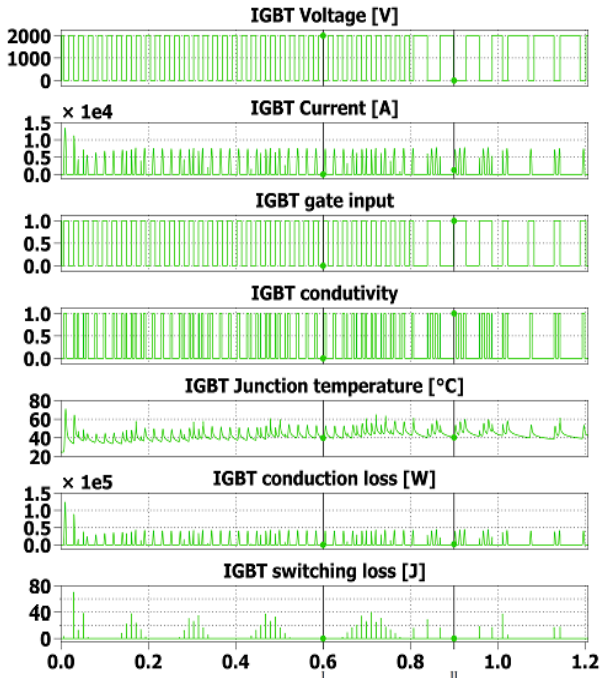
۴. نتایج شبیه‌سازی حرارتی بر اساس مدل حرارتی ارائه شده در درایور با 2LVSC (6+1) در VSPSP، حاکی از آن است که به دلیل کاربرد کولینگ‌ها و هیت‌سینک‌های مناسب، متوسط دمای ثابت در کل duty Cycle کانورترها به میزان ۴۵ درجه سلیسیوس است که در نمونه VSWP، میزان آن ۲۵/۰۰۰۱ درجه سلیسیوس است؛

⁵Mean Time to Between Failure

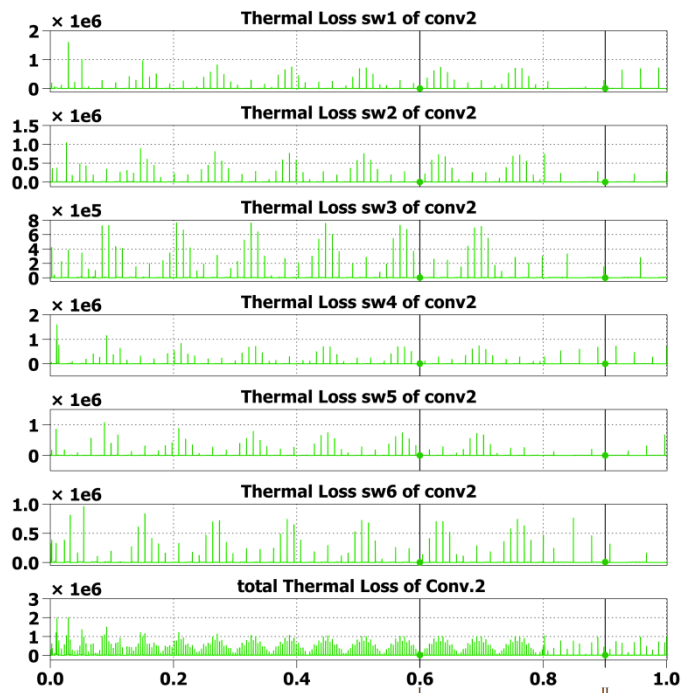
(الف)



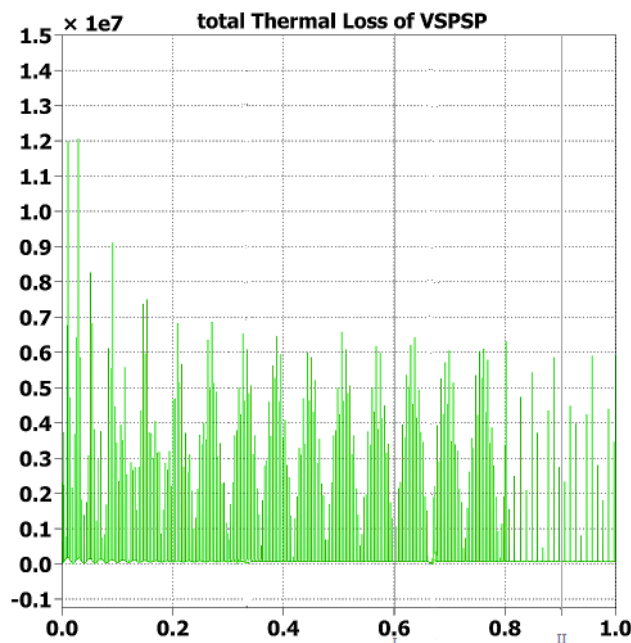
(ب)



(پ)

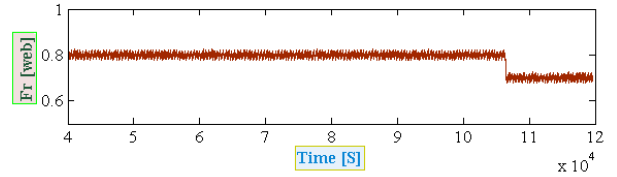
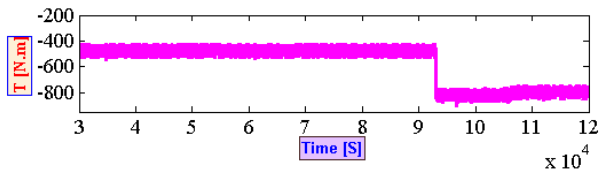


(ت)

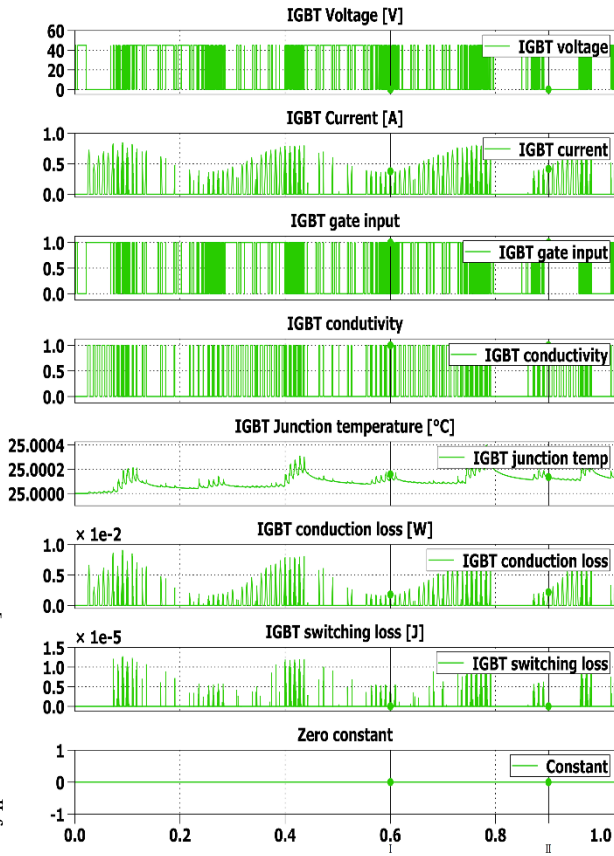


شکل (۵): نتایج شبیه‌سازی در ابور 250MW با 2LVSC (6+1) در VSPSP (الف) گشتاور و شار الکتریکی؛ (ب) نمودارهای مشخصات و تلفات IGBT؛ (پ) نمودارهای تلفات کانورتر ۲؛ (ت) نمودار تلفات کل در VSPSP

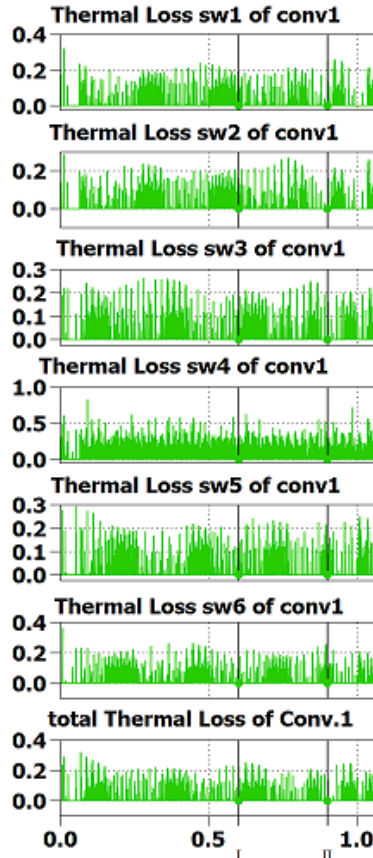
(الف)



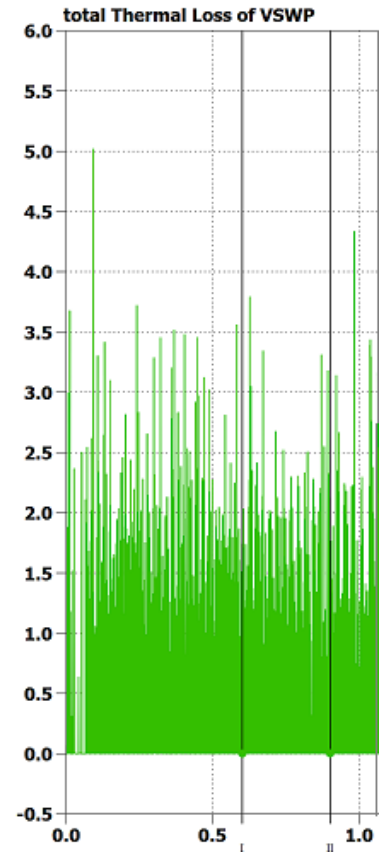
(ب)



(پ)



(ت)



شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی درایور 2.2KW با 2LVSC (6+1) در VSWP (الف: گشتاور و شار الکتریکی؛ ب) نمودارهای مشخصات و تلفات IGBT؛ پ) نمودارهای تلفات کانورتر؛ ت) نمودار تلفات کل در VSWP

مراجع

- Abdellatif, M; Debbou, M; Slama-Belkhdja, I, & Pietrzak-David, M, (2013). Simple low-speed sensorless dual DTC for double fed induction machine drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(8), 3915-3922.
- Baranwal, R; Basu, K; Mohan, N, (2014). Carrier-based implementation of SVPWM for dual two-level VSI and dual matrix converter with zero common-mode voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(3), 1471-1487..
- Alizadeh Bidgoli, M; Bathaee, S. M. T, (2015). Full-state variables control of a grid-connected pumped storage power plant using non-linear controllers. *Electric Power Components and Systems*, 43(3), 260-270.
- Bidgoli, M. A; Mohammadpour, H. A; & Bathaee, S. M. T, (2015). Advanced vector control design for DFIM-based hydropower storage for fault ride-through enhancement. *IEEE transactions on energy conversion*, 30(4), 1449-1459.
- Bose, B, *Power Electronics and Motor Drives Advances and Trends*, 2020. Knoxville, Tennessee.
- Desingu, K; Selvaraj, R; Kumar, B. A; Chelliah, T. R, (2020). Thermal performance improvement in multi-megawatt power converters serving to asynchronous hydro generators operating around synchronous speed. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(3), 1818-1830.
- Dodge, J, (2020). 3L ANPC vs. 3L NPC Inverters. *UnitedSiC Application Note UnitedSiC_AN0023*.
- Furuya, S; Taguchi, T; Kusunoki, K; Yanagisawa, T; Kageyama, T; Kanai, T, (1993, April). Successful achievement in a variable speed pumped storage power system at Yagisawa power plant. In *Conference Record of the Power Conversion Conference-Yokohama 1993* (pp. 603-608). IEEE.
- Hafeez, M., Uddin, M. N., Rahim, N. A., & Ping, H. W. (2013). Self-tuned NFC and adaptive torque hysteresis-based DTC scheme for IM drive. *IEEE transactions on industry applications*, 50(2), 1410-1420.
- Han, Y; Kim, S; Ha, J. I; Lee, W. J, (2013). A doubly fed induction generator controlled in single-sided grid connection for wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28(2), 413-424.
- Herzog, H, (2006). *Major Applications of Power Electronics in Hydro Power Plants*, International alters Power & Dam Construction Magazine, pp. 28-30, October.
- Hosseini, S. M. H; Rezvani, A, (2020). Modeling and simulation to optimize direct power control of DFIG in variable-speed pumped-storage power plant using teaching-learning-based optimization technique. *Soft Computing*, 24(22), 16895-16915.
- Hosseini, S. M. H; Semsar, M. R; Aghasi, M, (2 & 2012). *Technical and Economic Comparison of Control Methods for Pump-Storage Power Plants*, First International Conference and Third National Conference on Dam and Hydropower Plants (ICDH), Ministry of Energy, Tehran, Iran.
- Hosseini, S. M. H; Semsar, M. R, (2016). A novel technology for control of variable speed pumped storage power plant, *Journal of Central South University*, 23, 2008-2023.
- ANSI/BICSI002, (2019). *Data Center Design and Implementation Best Practices*.
- ANSI/TIA942, (2017). *Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers*.
- Hu, J; Zhu, Z. Q, (2011). Investigation on switching patterns of direct power control strategies for grid-connected DC-AC converters based on power variation rates, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(12), 3582-3598.
- Jiao, Y; Lee, F. C, (2015). New modulation scheme for three-level active neutral-point-clamped converter with loss and stress reduction, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), 5468-5479.
- Joseph, A; Selvaraj, R; Chelliah, T. R; Sarma, S. A, (2018). Starting and braking of a large variable speed hydrogenerating unit subjected to converter and sensor faults, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(4), 3372-3382.
- Joseph, A; Chelliah, T. R, (2017). A review of power electronic converters for variable speed pumped storage plants: Configurations, operational challenges, and future scopes, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(1), 103-119.
- Joseph, A; Desingu, K; Semwal, R. R; Chelliah, T. R; Khare, D, (2017). Dynamic performance of pumping mode of 250 MW variable speed hydro-generating unit subjected to power and control circuit faults, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(1), 430-441.
- Joseph, A; Chelliah, T. R; Selvaraj, R; Lee, K. B, (2018). Fault diagnosis and fault-tolerant control of megawatt power electronic converter-fed large-rated asynchronous hydrogenerator. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7(4), 2403-2416.
- Katebi, R; He, J; Weise, N, (2017). An advanced three-level active neutral-point-clamped converter with improved fault-tolerant capabilities. *IEEE Transactions on power Electronics*, 33(8), 6897-6909.
- Kucka, J, (2019). Quasi-two-level PWM operation of modular multilevel converters: implementation, analysis, and application to medium-voltage drives.
- Phan, V. T; Lee, H. H, (2011). Control strategy for harmonic elimination in stand-alone DFIG applications with nonlinear loads, *IEEE transactions on power electronics*, 26(9), 2662-2675.
- Schwery, A; Fass, E; Henry, J. M; Bach, W; Mirzaian, A, (2005). *Pump storage power plants, ALSTOM's long experience and technological innovation*, Hydro 2005.
- Schmidt, J; Kemmetmüller, W; Kugi, A, (2017). Modeling and static optimization of a variable speed pumped storage power plant, *Renewable Energy*, 111, 38-51.
- Semsar, M. R.; Hosseini, S. M. H; Afjei, S. E, (2013). Investigation of a Variable Speed Pumped Storage Power Plant by Novel Control Technology, *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 2(18).
- Xia, Z; Liu, Z; Guerrero, J. M, (2020). Multi-objective optimal model predictive control for three-level ANPC grid-connected inverter, *IEEE Access*, 8, 59590-59598.
- Yaramasu, V; Wu, B, (2013). Predictive control of a three-level boost converter and an NPC inverter for high-power PMSG-based medium voltage wind energy conversion systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(10), 5308-5322.
- Zhang, Y; Zhu, J.; Zhao, Z; Xu, W; Dorrell, D. G, (2010). An improved direct torque control for three-level inverter-fed induction motor sensor less drive, *IEEE transactions on power electronics*, 27(3), 1502-1513.