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

¹Department 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 convertors (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

Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-17]

سرعت متغير

نوع مطالعه: پژوهشی محمدرضا سمسار^۱، سیدمحمدحسن حسینی^۲، سیدبابک 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 smh110@azad.ac.ir
 ۳- گروه مهندسی برق - واحد علوم و تحقیقات تهران - دانشگاه آزاد اسلامی - تهران - ایران
 ۳- گروه مهندسی برق - واحد علوم و تحقیقات تهران - دانشگاه آزاد اسلامی - تهران - ایران

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 کانور ترهای ۲+۶ پیشنهاد می کند. مدلهای VSPSP هیدرولیک و الکتریکی ارائه شده است که در ادامه درایور VSPSP معرفی می شوند. به همین ترتیب، روشهای سوئیچینگ و کنترل درایو توضیح داده شده ودرایور با 2LVSC (++6) معرفی شده است. در همین راستا، درایور VSPSP با کانور ترها با آرایش ۲+۶ به عنوان یک توپولوژی جدید پیشنهاد می شوند و در ادامه، مدلهای تلفات حرارتی این درایور نیز معرفی می شوند و تلفات حرارتی درایور جدید شبیه سازی و تحلیل می شوند درنهایت نمونه ۲۵۰۷ VSPSP معرفی و تعاین درایور نیز معرفی می شوند و تلفات حرارتی درایور جدید شبیه سازی و تحلیل می شوند و 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 از VSPSP شده است و مدل حرارتی پیشنهادی، 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 افزایش سرعت تعمیر، نگهداری و افزایش مدت زمان مابین هر خرابی (MTBF) درایور و VSPSP شده است و مدل حرارتی پیشنهادی، منجر به افزایش سرعت تعمیر، نگهداری و افزایش مدت زمان مابین هر خرابی در این (VSPS شده است و مدل حرارتی پیشنهادی، منجر به افزایش سرعت تعمیر، نگهداری و افزایش فرآیند تغییر سرعت شده است؛ خروجیهای این پروژه در نرمافزار MATLAB 2021/Plexim شبیه مازی و با نتایج شبیه سازی یک

واژه های کلیدی: DTFC، (1+6) 2LVSC، کانور ترهای در ایور (۱+۶)، مدل حرارتی، VSPSP.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

نام نویسنده مسئول: سیدمحمدحسن حسینی

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

۱ ـ مقدمه

از دهههای ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، ماشینهای سرعت متغیر بهجای نیروگاههای تلمبهای-ذخیرهای (PSP) مورد استفاده قرار گرفتهاند. امروزه استفاده از PSP با سرعت متغير (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 2006). درايورهای مدرن DFAM¹ با مبدلهای منبع ولتاژ دو و سهسطح تغذیه (2LVSC و 3LVSC) در حال حاضر در نظر گرفته می شوند. 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 3LVSC- حسگر تلفات یک اینورتر (Zhang, Zhu et al. 2012) ANPC را برای یک موتور القایی توصیف می کند 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 (Yaramasu & Wu, 2014) پیشنهاد شد. مبدل پیشنهادی تقویت کننده سه سطحی سمت شبکه (یکسو کننده دیودی و -3LVSC NPC سمت ماشین سنکرون یا PMSG) در توربینهای بادی است و یک روش پیشبینی برای کنترل کل سیستم ارائه می شود 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. بهعلاوه، این مطالعه، یک نمونه آزمایشی را برای تغذیه یک بار غیرخطی با ۲/۲ كيلووات DFIG توصيف مىكند. كنترل بدون حسگر گشتاور مستقيم دوگانه DFIM در (Abdellatif & Debbou, 2014) معرفی می شود که موقعیت روتور با استفاده از یک اتصال 2LVSC به روتور و استاتور یک DFIM و یک سنسور سرعت تجزیه و تحلیل می شود که در نهایت، یک نمونه آزمایشی برای اعتبارسنجی کل سیستم به کار گرفته میشود. به طور مشابه، یک مبدل ۱/۵ کیلوولت آمپر با استفاده از کنترل توان مستقیم در (Jia-bing, 2012) تجزیه و تحلیل می شود. که مشکلات

¹Doubly FED Asynchronous Machin

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 خودتنظیم شده برای یک موتور القایی قفس سنجابی ۱ اسب بخاری پیشنهاد شد که منجر به بهبود عملکرد دینامیکی و کاهش امواج گشتاور می شود؛ با اعمال سیگنال های صحیح به درایو روتور که توان اسمی آن تنها کسری از توان اصلی تعریفشده در سمت استاتور DFIM است؛ می توان به انواع ویژگیهای کنترل دسترسی داشت. این کسر حداکثر مقدار لغزش روتور را در شرایط عملیاتی حالت پایدار تقریب میزند که بر این اساس، DFIMها می توانند عملکرد مناسبی را در محدوده خاصی از توليد برق تحت شرايط عملياتي لغزش كوچك نشان دهند. اگرچه کاربرد سیستمهای بادی در حال توسعه است؛ نقصهای اولیه DFIMها به طور فزاینده ای آشکار شده اند و به اختلالات شبکه بسیار حساس هستند. كاهش ولتاژ مي تواند باعث ايجاد اضافه ولتاژ و جريان اضافي در سیم پیچهای روتور شود که در صورت عدم انجام اقدامات متقابل باعث از کار افتادن مدار می شود. تحقیقات گسترده ای توسط دانشگاه و صنعت برای تخمین دقیق این ولتاژها و جریانها و طراحی طرحهای حفاظتی در برابر چنین اختلالاتی انجام شده است؛ درادامه می توان 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 انتهای باز کنترل شده 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 QK مقایسه شد. به گفته نویسندگان، در این مطالعه، ریپل جریان افزایش یافته است که در ولتاژ متوسط درست می باشد. بنابراین،qusi- 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 اساسا مبتنی بر کنترل مستقیم دامنه شار روتور و گشتاور روتور DFIM است که بر اساس نوسانات گشتاور زیاد و خطای بحرانی یکسوکننده متصل به روتور استاندارد، روش پیشنهادی در (Maciejewski & Iwanski, 2020) اصلاح مى شود. مرجع (Hosseini & Rezvani, 2020) یک استراتژی جدید با درنظر گرفتن SVM در 2LVSC برای VSPSP معرفی میکند که منجر به کاهش امواج قدرت فعال و راکتیو استاتور می شود و یک رویکرد برداری متصل جديد به مبدل جانبي 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.

Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-17]

در (Bidgoli & Bathaee, 2015)، یک کنترل کننده 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) عملكرد، مدارهاي حفاظتي و مزایای اقتصادی PSP مذکور را بررسی کرد. عملکرد دینامیکی نهایی در برابر خطاهای (Joseph & Desingu et al. 2017) در در برابر خطاهای PSP 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 Joseph & RajChelliah etal.) کيلووات اعتبارسنجي شد. مرجع 2018) تشخیص و کنترل عیب PSP، ۲۵۰ مگاواتی را توضیح میدهد که در آن 3LVSC-NPC با رویکرد PWM سوئیچ می شود 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 الكتريكي و تلفات مبدل پيشنهادي را كاهش داد. در نهايت، روش مذكور با استفاده از نمونه آزمایشی تایید شد. بر اساس SVM- ،SVM 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 (& SP Gyerrero, 2020) مورد بحث قرار گرفت. از طريق سوئيچينگ MO2 پیشنهادی، تلفات مبدل بر اساس پارامترهای تلفات نامتعادل به تابع هزينه اضافه شد كه منجر به كاهش تلفات نامتعادل شد. در (Desingu,) Selvaraj et al. 2020)، يك روش كنترل حرارتي فعال، انطباق نوسانات حرارتی مبدل (3LVSC-NPC 5*5 - مگاوات) را مشخص می کند که در نهایت با استفاده از رویکرد PWM سوئیچ می شود. تلفات توان و حرارت در RSCهای متصل به DFIM کاهش یافت و نتایج به صورت تجربى تاييد شد. مرجع (Dodge, 2020) 3LVSC-NPC و 3LVSC-ANPC را با سوئیچهای FET و روش PWM توصیف می کند. 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 می کند. علاوه بر این، محاسبه تلفات توان حالت پایدار برای انتخاب روش مبدل و مدولاسیون و انتخاب کمیت سوئیچ سودمند بود. (Hosseini, Semsar & Aghasi, 2012) بيان مي كند كه طراحي 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

القایی با مبدل ۶ پالسی، ۶) ماشینهای القایی با مبدل ۱۲ پالسی، ۷) ماشین القایی با مبدل PWM، ۸) ماشینهای القایی با تغذیه دوبل 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 برق آبی شامل: ماشینهای سنکرون با کموتاسیون خط ۱۲ پالس، DFAM با روتور سیم پیچی شده با سیکلوکانورتر و DFAM با مبدل منبع ولتاژ است. نویسندگان یک روش کنترل بهبودیافته برای DFAM با مبدل منبع ولتاژ ارائه کردند. روش ارائه شده در (DFAM با مبدل منبع ولتاژ ارائه کردند. روش سیاهبیشه را به عنوان مطالعه موردی ارزیابی کرد. درایور اعمال شده در یک مبدل سمت ماشین در مود تولید شبیه سازی شد. علاوه بر این، نیک مبدل سمت ماشین در مود تولید شبیه سازی شد. علاوه بر این، فروجی های درایور پیشنهادی با هم مقایسه شدند و تمام نتایچ که در آن مبدل های 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 (1+6) 2LVSC برای VSPSP ارائه خواهد شد. این توپولوژی مدرن با ۲+۶ 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 نمونهٔ VSWN از VSW مقایسه و اعتبارسنجی خواهد شد و در نهایت، تمام سناریوی مذکور در نرمافزار PLEXIM/block شد و در نهایت، تمام سناریوی مذکور در نرمافزار MATLAB

VSPSP مدل هيدروليک

در این قسمت، مدل هیدرولیکی این نیروگاه ارائه میشود. اینرسی آب، تراکم پذیری 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:

$$(H_0-H-H_f) \rho gA = \rho Al \frac{dU}{dt}$$
(1)

$$H_{f} = f \times \frac{L}{D} \times \frac{U^{2}}{2g} = f_{p} \times Q^{2}$$
 (7)

$$f_{p} = \frac{L}{D} \times \frac{f}{2g} \times \frac{1}{A^{2}}$$
(°)

 ${
m H}$ ، در معادلات اصلی بالا، ${
m H}_{
m o}$ نشان دهنده هد استاتیک آب، ${
m H}_{
m o}$ نشان دهنده هد آب در ورودی توربین و ${
m H}_{
m f}$ از دستدادن هد به دلیل ${
m f}_{
m p}$ و ${
m f}_{
m p}$ اصطحکاک است. ضریب اصطحکاک و ضریب افت هد به ترتیب f

هستند. علاوه بر این، L، Dو U به ترتیب نشان دهنده طول مجرا، قطر ینستاک و سرعت آب داخل آن هستند.

$$T_{w} = \frac{LQ_{base}}{H_{basegA}} \times \frac{LU_{base}}{H_{baseg}}$$
(۴)
Tw e uncertainty of the end of th

پنستاک هستند که در بالا بیان شد. معادله قدرت مکانیکی توربین در حالت پایدار به شرح زیر است:

$$P_{\rm m} = \eta Q \rho g H \tag{(a)}$$

$$P_m = A_t H(Q - Q_{nl}) - D_n G\Delta\omega$$
 (8)

$$A_{t} = \frac{1}{G_{t} - G_{t}} * \frac{\text{Turbine MWrating}}{\text{Generator MW rating}}$$
(Y)

$$Q = G\sqrt{H}$$
 (A)

از آنجایی که رلندمان توربین هرگز ۱۰۰ درصد نیست؛ جریان بارگذاریشده ای R توربین باید از جریان اصلی کم شود تا جریان موثری که نیروی مکانیکی تولید میکند؛ به دست آید. Dn ضریب میرایی توربین و At 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).

$$v_{sa}(t) = R_{s} \cdot i_{sa}(t) + \frac{d\Psi_{sa}(t)}{dt}$$
(9)
$$v_{sa}(t) = R_{s} \cdot i_{sa}(t) + \frac{d\Psi_{sb}(t)}{d\Psi_{sb}(t)}$$

$$\mathbf{v}_{sb}(t) = \mathbf{R}_{s} \cdot \mathbf{i}_{sb}(t) + \frac{d\Psi_{sc}(t)}{dt}$$
(11)
$$\mathbf{v}_{sc}(t) = \mathbf{R}_{s} \cdot \mathbf{i}_{sc}(t) + \frac{d\Psi_{sc}(t)}{dt}$$
(11)

که در آن (t)
$$i_{sa}$$
 (t) i_{sc} (t) i_{sc} (t) i_{sc} (t) i_{sc} (t) که در آن (t) i_{sa} (t) i_{sc} (t) v_{sc} (t) v_{sc} (t) v_{sc} (t) و v_{sc} (t) v_{sc} (t) و b i_{sc} b i_{sc} i_{sc} i_{sc} i_{sc} (t) v_{sa} v_{sc} v_{s

$$\vec{v}_r^a = R_r \vec{t}_r^a + \frac{d \overline{\Psi}_r^a}{dt} + j(\omega_s - \omega_m) \overline{\Psi}_r^a$$
(17)

$$\Psi_s = L_s \dot{t}_s^{\rm d} + L_h \dot{t}_r^{\rm d} \tag{14}$$

$$\Psi_{\mathbf{r}}^{\mathbf{r}} = \mathbf{L}_{\mathbf{h}} \vec{\mathbf{i}}_{\mathbf{a}}^{\mathbf{a}} + \mathbf{L}_{\mathbf{r}} \vec{\mathbf{i}}_{\mathbf{r}}^{\mathbf{a}} \tag{10}$$

$$\overline{\Psi}_{s}^{s} = L_{s}\overline{i}_{s}^{s} + L_{h}\overline{i}_{r}^{s} = L_{s}\overline{i}_{s}^{s} + L_{h}e^{j\theta}m\overline{i}_{r}^{r}$$
(19)

$$\overline{\Psi}_{r}^{r} = L_{r}\overline{i}_{r}^{r} + L_{h}\overline{i}_{s}^{r} = L_{h}e^{-j\theta}m\overline{i}_{s}^{s} + L_{r}\overline{i}_{r}^{r}$$
(1Y)

که در آن L_s و L_r به ترتیب خودالقایی اســـتاتور و روتور هســـتند. اندوکتانس متقابل بین ســیم,پیچهای روتور و اســتاتور با Lh نشـان داده

می شود. خودالقایی روتور و استاتور با استفاده از معادلات زیر تعیین مهرشود:

$$L_{s} = L_{\sigma s} + L_{h} \tag{1}$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_h \tag{19}$$

درایور DFAM به کارگرفته شده در VSPSP از نوع MVSC و 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 به کار گرفتهشده در این مقاله، DTFC است؛ زیرا می تواند زوایای آتش مبدل تعیینشده توسط موقعیت شار روتور را کنترل کند. علاوه بر این، می تواند زاویه شار را بر اساس فرکانس مرجع تولید کند. این روش با معادلات زیر مدلسازی شده است:

$$T_{em} = \frac{3}{2} * p. p. *Im\{\vec{\Psi}_{Fxs}, \vec{i}_{r}^{**}\}$$
(7.)

$$\vec{v}_r^r = R_r \vec{t}_r^r + \frac{d}{dt} \overline{\Psi}_{Fxr} \tag{(1)}$$

بر این اساس، $\overline{\Psi}_{Fxr}$ گشتاور الکترومکانیکی است و $\overline{\Psi}_{Fxr}$ به ترتیب شارهای استاتور و روتور هستند. $\overline{\nabla}_{F}$ ولتاژ روتور و \overline{P}_{r} و $\overline{\Gamma}_{r}$ 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 (2016 & Mosseini R

درصورت استفاده از درایور جدید پیشنهادی این مقاله، شار روتور با همان زاولیای 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 (eTen و $|\widehat{\Psi}_r|$) 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

یافته است و منجر به افزایش قابلیت اطمینان از عملکرد درایور می شود و سرعت تعمیر و نگهداری از تجهیزات را بهبود می بخشد.

VSPSP معرفی توپولوژی پیشنهادی درایور VSPSP

با توجه به اســتانداردهای کاربردی BICSI و TIA942 برای طراح دیتاسینترها و طبقهبندی Tear3 زیرسیاختهای برق ذکرشی (ANSI/BICSI, 2019) در آنها، میتوان مبدل ۲۴ مگاواتی اعمالش در این VSPSP را به شـش مبدل موازی فعال با ظرفیت ۴ مگاوات کانورتر*۴ مگاوات) تقسیم کرد (ANSI/TIA942, 2017) و به صور N+1، آرایش داد که در آن N تعداد مبدلهایی با کمترین ظرفیت نشان میدهد. به عنوان نمونه، در این مقاله، کوچکترین ظرفیت کانو کاربردی ۴مگاوات و N برابر با ۶ است. به عبارت دیگر، شــش کانو, موازی به طور همزمان فعال با ظرفیت ۴ مگاوات و یک کانورتر آما بـهكـار (standby) و يـا افـزونـه^۲ ۴ مـگـاوات كـه بـر اســـا مدولاسيون DTFC فعال ميباشند؛ ايجاد ميشود. اعتبارسنجي دار مذکور از تقسیم یک مبدل نمونهٔ ۱۲۰۰ وات که به شـش مبدل فعال موازی ۲۰۰ واتی همراه با یک مبدل مشابه افزونه ۲۰۰ وات در VSWP انجام می شود (۶ کانور تر ۲۰۰ وات) که بر اساس DTFC فعال میباشد و با آرایش ۱+۶ با یکدیگر اتصال دارند؛ بنابراین، ما می توانیم با توپولوژی جدید پیشنهادی کاربرد کانور تر با آرایش ار تباطی ۱+۶، درایورهای جدید ایجاد کنیم که در نمودار بلوکی شــکل۳ارائه شده است که در آنها ۷ کانورتر موازی نشان داده شده است و هفتمین کانورتر، همان کانورتر آماده به کار و یا افزونه، است که در صورت نیاز و یا معیوبشدن هر کدام از ۶ کانورتر فعال، میتواند در سریعترین زمان ممكن توســط اپراتور بهرهبردار، كانورتر معيوب به صــورت اتصــال داغ (Hot Plug) جایگزین نمونه سـالم مشـابه آن گردد؛ بدون آنکه در عملکرد سیستم در زمان طولانیمدت 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. کانورترهای با آرایش ارتباطی ۱+۶؛

DCCU شـامل ۵ قسـمت کاربردی به شـرح ذیل اسـت: Estimation.۱؛ ۲.فیلترمقایسهکننده هیسترزیس۳سطحی گشتاور؛ ۳. فیلترمقایسهکننده هیسترزیس۲سطحی شار؛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 مقایسه کننده هیسترزیس یا کنترل کننده های پهنای باند ۳ در گشتاور $T_{\rm em}$ و شار⁺ $|\overrightarrow{\Psi_r}|$ و تولید خطاهای گشتاور $eT_{\rm em}$ و اندازه شار $|\overrightarrow{\Psi_r}|$ ، امکان تولید بردار ولتاژ را

| است و از خروجی آنها برای انتخاب نحوه کلیدزنی استفاده میگردد. | حى |
|---|-----------|
| چگونگی عملکرد این مقایسه گرها بادرنظر گرفتن موقعیت شار روتور برای | ی _دہ |
| کنترل کانورتر، جهت تولید بردار ولتاژ مناسب در حالات گوناگون مطابق | ىدە |
| جدول سوئیچینگ ۱ آورده شده است. باید توجه داشت که این | ۶) |
| مقایسه گرها در قسمت گشتاور از سهسطح ۱، ۰ و ۱- و در قسمت شار | , ت |
| از دو سطح ۱ و ۱ - تشکیل شده است. در قسمت گشتاور سطح ۱ مبین | ر ا, د |
| حرکت در حالت بالاتر از سرعت سنکرون (Hyper Synchronous) و | ر , ت, |
| سطح ۱-، حرکت در حالت پایین ر از سرعت سنکرون (Sub) | رتر |
| (Synchronous را بیان میدارد و سطح صفر جهت کاهش ریپل گشتاور | ادە |
| میباشد. | اس |
| جدول ۱: جدول سوئیچینگ مبدل روتور دوسطحی 2LVSC) | يور |

برای ایجاد پالس کانورتر فراهم می آورند. برای کنترل اندازه شار و

گشتاور در ساختار DCCU از دو مقایسه کننده هیسترزیس، سهسطحی

و دوسطحی استفاده می گردد. ورودی این مقایسه گرها، خطاهای مذکور

| (6+1)) | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|--|--|--|
| eT_{em} | | 1 | | -1 | | | | |
| $\vec{E \Psi_r }$ | | 1 | -1 | 1 | -1 | | | |
| موقعیت شار روتور (سکتورها) | 1 | V ₆ | V ₅ | V_2 | V ₃ | | | |
| | 2 | V_1 | V_6 | V ₃ | V_4 | | | |
| | 3 | V ₂ | V_1 | V_4 | V ₅ | | | |
| | 4 | V ₃ | V ₂ | V ₅ | V ₆ | | | |
| | 5 | V_4 | V ₃ | V ₆ | V ₁ | | | |
| | 6 | V ₅ | V_4 | V_1 | V_2 | | | |
| | | 1.0 | | | | | | |

جدول ۲ بهطور خلاصیه مقایسیه فنی و اقتصادی و ارزیابی محرکهای ذکرشده را نشان میدهد؛ بررسی دیتاهای جدول حاکی از آن است که درایور با 2LVSC به دلیل کاربرد تنها یک کانورتر ۲۴ مگاوات دارای پایینترین قابلیت اطمینان و بیشترین هزینه نگهداری و بهرهبرداری (O&M) در بین سایر کانورترهاست. در همین راستا، کاربرد VSPSP با درایور نوین پیشنهادی با (1+6) 2LVSC و ۷کانورتر ۴ مگاوات، علیرغم هزینه اولیه (هزینه تجهیزات مدرن کاربردی) بیشتتر نسبت به درایور با 2LVSC به دلیل کاربرد کاربردی) بیشتر نسبت به درایور با 2LVSC به دلیل کاربرد نگهداری سریع و آسان، افزایش قابلیت اطمینان، هزینه M&O کم و به تبع آن ⁴MTBF بالاتر حاصل می شود که میتواند معایب درایور با دیگر توصیه و تأکید می شود که نتایج حاصل از بررسیها در قسمت دیگر توصیه و تأکید می شود که نتایج شیهسازی 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

| Mean Time to Between Failure | ² redundant ³ HysterisisBand |
|------------------------------|---|
| | |

(case) و از آن به هیتسینک و محیط بیرونی درایورها است. در چنین تجهیزات 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 (1+6) 2LVSC در قسمت شبیهسازی توضیح داده شده است.

مدلهای تلفات حرارتی درایورهای پیشــنهادی در معادلات زیر توضـیح داده شده است:

 $P_{sw} = (E_{on} + E_{off}) * f_{sw}$ (77)

 $P_{\rm loss} = P_{\rm sw} + P_{\rm on \ state} \tag{(77)}$

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

$$\begin{split} Z_{th(j-c)}(t) &= \sum_{i=1}^{n} R_i \left(1-e^{-t/\tau_i}\right) \qquad (\Upsilon^{r}) \\ R_i \mbox{ indication and provide the stress of the stress o$$

۶- نتایج شبیهسازی (مطالعه موردی)

نیروگاه تلمبه ای - ذخیره ای سیاه بیشه در شمال ایران، بین کرج و چالوس و در مجاورت روستای سیاه بیشه 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 در ایورهای جدید بر عملکرد واحد مورد نظر بررسی می شود؛ انجام شده است. تجزیه و تحلیل های نهائی با مقایسه نتایج حاصل از به کارگیری در ایورهای قبل تاکنون انجام می شود. پارامترهای هر سیستم در جداول ۳،۴ و ۵ ارائه شده است. سوئیچهای استفاده شده توسط در ایورهای TSPSP از نوع IGBT با محدوده دمای ۲۵ تا ۱۲۵ سلیسیوس هستند و در TSWP از نوع IGBT با مشخصات ولتاژ اسمی ۱۲۵۰ ولت، جریان اسمی ۲۰۰۰ آمپر و محدوده دمای ۲۵ تا ۱۲۵ سلیسیوس هستند. شکل های ۵ و۶ به

جدول ۲: مقایسه و ارزیابی فنی و اقتصادی توپولوژی پیشنهادی درایورها

| نوع درايور | راندمان ٪ | تلفات ٪ | هزينه اوليه./ | قابلیت اطمینان | <i>هزینه</i> 0 M& | مزایای اضافی | |
|----------------|--------------|------------|------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|
| 2LVSC | ٨٠ | ٢۵ | ۱۰۰ | پايين | زياد | سوئیچینگ در فرکانس بالا | |
| 2LVSC (6+1) | ٨٠ | ٢۵ | 118 | بالا | کم | تعمیر و نگهداری سریع و آسان | |

ترتیب نتایج شــبیـهســازی درایور بـا (1+5) 2LVSC را در ۲۵۰۷SPSPمگاوات و تأیید آن در ۷SWP/۲کیلووات با توپولوژی

جدید پیشنهادی ۱+۶ 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 هیدرولیکیVSPSP

| جریان آب بدون بار (m3 /S) | جریان آب (m³/S) | هد (m) | سرعت اسمی (rpm) | توان خروجی اسمی توربین (MW) |
|---------------------------------|--------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------------|
| 8 | 59.49 | 476.17 | 500 | 260.35 |

جدول ۴: ویژگیهای DFAM در VSPSP

| واكنش | راكتانس | مقاومت | راكتانس روتور | مقاومت |
|---------|-------------|---------------|---------------|---------|
| متقابل | استاتور | استاتور | (pu) | روتور |
| (pu) | (pu) | (pu) | | (pu) |
| 0.5 | 0.101 | 0.01453 | 0.1 | 0.01393 |
| جفت قطب | ولتاژ روتور | ولتاژ استاتور | قدرت فعال | توان |
| | (KV) | (KV) | (MW) | ظاهرى |
| | | | | (MVA) |
| 6 | 2 | 18 | 250 | 306 |

جدول ۵: ویژگیهای DFAM در VSWP

| واكنش | راكتانس | مقاومت | راكتانس | مقاومت | |
|---------|-------------|---------------|---------------|--------|--|
| متقابل | استاتور | استاتور | روتور | روتور | |
| (pu) | (pu) | (pu) | (pu) | (pu) | |
| 0.04847 | 0.052953 | 2.14 | 0.052953 | 0.56 | |
| جفت قطب | ولتاژ روتور | ولتاژ استاتور | قدرت نامی(KW) | | |
| | (V) | (V) | | | |
| 6 | 40 | 440 | 2/2 | | |

است و در آنها سرعت متغیر ۸/۰ ثانیه است. مقایسه نتایج شبیهسازی این ۲ درایور با هم نشان می دهد 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، شکلهای ۵و۶ به ترتیب، حداکثر پیک تلفات هدایت سوئیچینگ ۲۰۲۹۲۸/۲۱ وات و ۲۰۰۰۳۸۹ وات و حداکثر دمای ثابت یک هیتسینک ۲۵/۲۰ و ۲۵/۰۰۰۳ درجه سلیسیوس است و نیز متوسط

402.12.3.4.7] [Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-17]

حدول ۶ مشخصات مدارجا داخیا. حدول ۶ مشخصات مدل جرارتی در VSPSP و

| <i>t</i> _a (°C) | <i>t_j</i> (°C) | نوع نيروگاه | $\begin{array}{c} R_{thj-c \ (IGBT)} \\ (\frac{K}{W}) \end{array}$ | $\begin{array}{c} R_{thj-c \ (Diode)} \\ (\frac{K}{W}) \end{array}$ | $\frac{R_{thc-h (IGBT)}}{(\frac{K}{W})}$ | $\begin{array}{c} R_{thc-h \ (Diode)} \\ (\frac{K}{W}) \end{array}$ | $(\frac{R_{thh-a}}{K})$ | |
|----------------------------|---------------------------|----------------|--|---|--|---|-------------------------|--|
| 125 | 25 | VSPSP | 0.0032 | 0.0061 | 0.0007 | 0.0015 | 0.001183 | |
| 123 | 23 | VSWP | 0.021 | 0.036 | 0.024 | 0.048 | 3.835641 | |

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 (6+1) 2LVSC، ۲/۲۲۳ وات و ۲۴۷۸/۰ وات است و همان طور که انتظار میرفت؛ نتایج درایور کاربردی با (1+6) 2LVSC با در VSCP که 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 ۲۵۰ ۷SPSP مگاوات در یک واحد از نیروگاه سیاهبیشه ارائه کرد. نتایج را میتوان به شرح زیر بیان کرد:

- ۱. استفاده از درایور نوین پیشنهادی با (1+6) 2LVSC 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 آسان تر و MTBF⁵ بالاتر درایورها، توپولوژی کاربرد آنها با (۱+۶) کانورتر به صورت هات پلاگ، پیشنهاد شد که در صورت استفاده از درایور با 2LVSC (6+1) در VSPSP، محقق می شود؛
- ۳. همچنین در تمامی درایورها، تغییرات در کمتر از ۰/۱ ثانیه، قابل مشاهده است و تمامی سوئیچهای IGBT مورد استفاده در درایورهای معرفیشده این مقاله بر اساس مدولاسیونDTFC، فعال میباشند؛
- ^٤. نتایج شبیه سازی حرارتی بر اساس مدل حرارتی ارائه شده در درایور با (1+6) 2LVSC در VSPSP، حاکی از آن است که به دلیل کاربرد کولینگها و هیت سینکهای 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؛

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







شکل (۲): مدار 2LVSC در VSPSP

⁵Mean Time to Between Failure



شکل (۳): درایور پیشنهادی جدید با (1+6) 2LVSC برای VSPSP 250MW وVSPSP 2.2KW؛ الف) نمودار بلوکی درایور پیشنهادی؛ ب)موقعیتهای شار روتور (سکتورها)



شکل (۴): مدل مشترک تلفات حرارتی درایورها با (1+6) 2LVSC در VSWP و VSWP و



شکل (۵): نتایج شبیهسازی در ایور 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



شکل (۶): نتایج شبیهسازی درایور 2.2KW با (1+6) 2LVSC در VSWP؛ الف) گشتاور و شار الکتریکی؛ ب)نمودارهای مشخصات و تلفات IGBT ؛ پ)نمودارهای تلفات کانورتر ۱؛ ت)نمودار تلفات کل در VSWP

Abdellatif, M; Debbou, M; Slama-Belkhodja, 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). Selftuned 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.

Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-17]