



Review and analysis of tidal current turbines and the application of induction switched reluctance generator (ISRG) for power generation from tidal energy resources

Narges Ghandi, Hadi Saghafi*, Mohammadali Abbasian

Department of Electrical Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author email: h.saghafi@iau.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 03 Jun 2025

Revised: 14 Aug 2025

Accepted: 30 Sept 2025

Published: 23 Nov 2025

Extended Abstract

Introduction

Tidal energy, a predictable and sustainable renewable source, offers significant potential for reducing dependence on fossil fuels. However, scaling this technology for industrial deployment requires a thorough evaluation of its technical and economic components, particularly tidal current turbines and their electrical generators. This review paper analyzes recent advancements in tidal energy system design and performance, with a novel focus on the application of induction switched reluctance generators. Findings reveal that by eliminating permanent magnets and incorporating rotor windings, these generators reduce manufacturing costs while enhancing efficiency and torque output compared to conventional switched reluctance machines and permanent magnet generators. These advantages position them as a promising technology for integration into tidal current turbines. The paper also examines fault-tolerant control strategies for sensor failures, operational distinctions between wind and tidal turbines, and technical challenges such as power grid short-circuit faults. Finally, a comparative analysis of various turbo-generators is provided, presenting a practical framework for selecting and optimizing technologies in the tidal energy sector.

Literature Scope and Selection

This study synthesizes findings from peer-reviewed journals, PhD theses, and technical reports published between 2018 and 2025. The selected literature encompasses comparative analyses of generator topologies, fault-tolerant control strategies, and performance metrics under marine conditions.

Generator Classification

The reviewed tidal energy generators are classified into four primary types:

Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG)

Switched Reluctance Machines (SRM)

Induction Machines (IM)

Induction Switched Reluctance Machines (ISRM)

Each type is evaluated based on key criteria, including torque density, efficiency, manufacturing cost, fault tolerance, and suitability for direct-drive tidal turbine applications.

ISRM Design Principles

The ISRM design eliminates the dependency on rare-earth magnets by incorporating windings into the rotor, thereby enhancing magnetic flux control. This configuration offers dual advantages: a reduction in manufacturing costs and a significant improvement in torque output. Finite Element Analysis (FEA) models were employed to simulate electromagnetic behavior and assess mechanical stress under realistic tidal loading conditions.



Results and Discussion

Simulations of tidal conditions demonstrated that ISRM generators achieve superior torque output and efficiency compared to both conventional Switched Reluctance (SRM) and Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG). The key performance findings are summarized as follows:

Torque Density: ISRM > SRM \approx PMSG

Efficiency: ISRM achieved peak efficiency of up to 92%, outperforming PMSG (88%) and SRM (85%).

Cost Reduction: The elimination of permanent magnets in ISRM designs reduces material costs by an estimated 30–40%.

Despite these advantages, ISRM systems present specific challenges, including:

Complex control requirements to manage highly dynamic tidal flows.

Potential grid synchronization difficulties during post-fault recovery.

The study concludes with a detailed comparative table of generator types across multiple technical parameters. This resource provides a practical framework for selecting and optimizing generator technology based on site-specific tidal characteristics.

Conclusion

The marine current energy sector is undergoing a significant transformation driven by technological innovation. As a clean and renewable resource, tidal energy presents considerable potential to displace fossil fuels. This study contributes to this transition by evaluating and comparing the performance of key generator technologies—namely induction machines, switched reluctance machines, permanent magnet synchronous generators, and induction switched reluctance machines—while also addressing their associated technical challenges. The research scope encompasses an analysis of marine current turbine design, integrated generator/flywheel storage systems, fault-tolerant sensor control strategies for marine environments, and a comparative assessment of wind versus tidal turbine operational principles. Realizing a sustainable energy future will necessitate continued investment in research, the advancement of technical expertise, and strengthened collaboration among stakeholders to enable the effective integration of tidal energy into the global energy mix.

Keywords: Renewable energies, Tidal stream turbine, Tidal dam, Induction Switched Reluctance Machine (ISRM).

Acknowledgments

The author gratefully acknowledges the contributions of researchers and engineers whose work laid the foundation for this review.

Conflicts of Interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Author Contribution

This manuscript was prepared and reviewed by all of the authors.

Citation: Ghandi, N, Saghafi, H, & Abbasian, M.A. (2025). Review and analysis of tidal current turbines and the application of induction switched reluctance generator (ISRG) for power generation from tidal energy resources, *Technical Strategies in Water Systems*, 3(2), 191-215. <https://doi.org/10.82185/tsws.2025.1208603>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بررسی و مرور توربوژنراتورهای جریان جزر و مدی و کاربرد ژنراتور سویچ رلکتانس القایی (ISRG) در تولید توان در منابع انرژی تجدیدپذیر جزر و مدی

نرگس قندی، هادی ثقفی*، محمدعلی عباسیان

گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: h.saghafi@iau.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

چکیده

انرژی جزر و مد به عنوان یکی از منابع پایدار و قابل پیش‌بینی انرژی تجدیدپذیر، ظرفیت قابل توجهی برای کاهش وابستگی سوخت‌های فسیلی دارد. با این حال، توسعه این فناوری در مقیاس صنعتی مستلزم بررسی دقیق عملکرد فنی و اقتصادی اجزای کلیدی آن، به ویژه توربین‌های جریان دریایی و ژنراتورهای الکتریکی مرتبط است. این مقاله با رویکردی مروری، به تحلیل مطالعات اخیر در زمینه طراحی و ارزیابی سیستم‌های تولید انرژی جزر و مدی می‌پردازد و درعین حال تمرکز ویژه‌ای بر عملکرد ژنراتورهای سویچ رلکتانس القایی دارد که برای نخستین بار در این حوزه بررسی می‌شوند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که حذف آهنربای دائم و اضافه شدن سیم پیچ روتور در این نوع ژنراتورها، ضمن کاهش هزینه‌های ساخت، موجب افزایش بازده و گشتاور خروجی نسبت به ماشین‌های سویچ رلکتانس معمولی و ژنراتورهای آهنربای دائم شده است. از این رو گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در توربین‌های جریان دریایی محسوب می‌شوند. این مقاله به بررسی استراتژی‌های کنترل تحمل خطای سنسور برای توربین‌های جریان دریایی، تفاوت‌های عملکردی میان توربین‌های بادی و جزر و مدی، و چالش‌های فنی نظیر خطاهای اتصال کوتاه در شبکه برق پرداخته است. همچنین با ارائه یک جدول مقایسه‌ای از انواع توربوژنراتورهای مورد استفاده، چارچوبی برای انتخاب و بهینه‌سازی فناوری‌های مرتبط با انرژی جزر و مدی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، توربین جریان جزر و مدی، سد جزر و مدی، ماشین سویچ رلکتانس القایی (ISRM)

استناد: قندی، ن.، ثقفی، ه.، و عباسیان، م.ع. (۱۴۰۴). بررسی و مرور توربوژنراتورهای جریان جزر و مدی و کاربرد ژنراتور سویچ رلکتانس القایی (ISRG) در تولید توان در منابع انرژی تجدیدپذیر جزر و مدی. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۳(۲): ۱۹۱-۲۱۵.

<https://doi.org/10.82185/tsws.2025.1208603>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

با توجه به افزایش چشمگیر مصرف انرژی الکتریکی و محدودیت منابع انرژی فسیلی، بهره‌برداران سیستم‌های قدرت به جستجوی راهکارهای نوآورانه برای مدیریت مصرف و تأمین انرژی سوق داده شده‌اند. این وضعیت ضرورت انتقال به منابع انرژی پایدار و تجدیدپذیر را بیش از پیش نمایان می‌سازد و افق‌های جدیدی برای آینده انرژی گشوده است (Sen & Kumar, 2018). مشکل اساسی نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، هزینه بالای سرمایه‌گذاری برای احداث آنهاست (Sahoo et al., 2018). هزینه سرمایه‌گذاری برای احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر بسته به نوع فناوری و شرایط پروژه متفاوت است. هزینه نیروگاه‌های خورشیدی ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ دلار، بادی ۱۲۰۰ تا ۵۰۰۰ دلار، زیست‌توده ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ دلار، و جزر و مدی ۵۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ظرفیت نصب‌شده برآورد می‌شوند. این ارقام تقریبی بوده و تحت تأثیر عواملی مانند مکان، عمق آب، و تکنولوژی مورد استفاده، قرار دارند. برای برآورد دقیق‌تر، مراجعه به گزارش‌های نهادهای معتبر بین‌المللی توصیه می‌شود. با توجه به کمبود منابع سوخت فسیلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یکی از راه‌های مؤثر تولید برق مطرح می‌شود. انواع این منابع شامل انرژی بادی، انرژی جزر و مد، زیست‌توده، انرژی خورشیدی و انرژی زمین‌گرمایی هستند. به‌کارگیری این منابع نه تنها می‌تواند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کند، بلکه به حفظ محیط‌زیست و توسعه پایدار نیز می‌انجامد.

انرژی جزر و مدی به‌عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر با قابلیت پیش‌بینی بالا، در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. نمونه‌های موفق تجاری این فناوری شامل نیروگاه لارنس در فرانسه (۱۹۹۶) با ظرفیت ۲۴۰ مگاوات و نیروگاه شیپوا در کره جنوبی (۲۰۱۱) با ظرفیت ۲۵۴ مگاوات هستند. پروژه MeyGen در اسکاتلند که با هدف تولید ۴۰۰ مگاوات از جریان‌های پرسرعت در حال توسعه است، به‌عنوان بزرگ‌ترین مزرعه جریان جزر و مدی جهان شناخته می‌شود. دیگر پروژه‌های شاخص در این حوزه شامل نیروگاه آنابولیس^۱ در کانادا (۱۹۸۴) با ظرفیت ۲۰ مگاوات، کیسلا یاگوبا^۲ در شوروی سابق (۱۹۶۷) با ظرفیت ۴۰۰ کیلووات، جی‌انگ‌زیا^۳ در چین (۱۹۸۰) با ظرفیت ۳/۹ مگاوات، و همچنین نیروگاه‌هایی در انگلستان (۲۰۰۸) و کره جنوبی (۲۰۰۹) با ظرفیت‌های ۱/۲ و ۱/۵۵ مگاوات می‌شوند (Ghandi, 2016). مرکز انرژی دریایی اروپا که در سال ۲۰۰۳ تأسیس شد، بزرگ‌ترین مرکز جهان برای آزمایش فناوری‌های جزر و مدی در شرایط واقعی دریا محسوب می‌شود. از جمله پروژه‌های اخیر این حوزه می‌توان به نیروگاه جزر و مد ساسکاتون^۴ (۲۰۲۳) با ظرفیت ۵۰ مگاوات و نیروگاه جزر و مد ریو^۵ (۲۰۲۳) با ظرفیت ۳۰ مگاوات اشاره کرد که به‌ترتیب با هدف توسعه فناوری‌های نوین و تحقیق و توسعه در زمینه انرژی جزر و مد در برزیل پیاده‌سازی شده‌اند. نیازهای آینده نیروگاه‌های جزر و مدی شامل گسترش ظرفیت تولید برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد انرژی، بهینه‌سازی فناوری‌ها به منظور افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها، و همچنین تداوم پژوهش‌ها برای توسعه فناوری‌های نوین و بهبود روش‌های موجود است. مشخصات این نیروگاه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه‌های جزر و مدی عمدتاً شامل خلیج‌ها، خورهای کوچک و ورودی رودها به دریاها می‌باشند. از مزایای این نیروگاه‌ها می‌توان به قابلیت تطبیق سریع با تغییرات مصرف شبکه و قیمت تمام‌شده پایین انرژی تولیدی اشاره کرد. (Ghandi, 2016; Carballo et al., 2009). هرگونه تغییر در عوامل فیزیکی و محیطی می‌تواند بر پدیده جزر و مد تأثیر گذاشته و در نتیجه، جریان‌های جزر و مدی و انرژی موجود در خورها را تغییر دهد (Khojasteh et al., 2021).

رویکرد رایج برای استخراج انرژی از جریان‌های جزر و مدی، استفاده از توربوژنراتورهای مخصوص این کاربرد است (Alvarez et al., 2021; Kalogirou, 2013; Adcock et al., 2021; Khojasteh et al., 2021). شکل (۱) نشان می‌دهد که کشورهای

¹ Annapolis

² Kisla Yakuba

³ Ji Ang Zi

⁴ Saskatoon

⁵ Rio

توسعه‌یافته‌ای مانند فرانسه، انگلستان و کره جنوبی به تدریج و از دهه ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ ظرفیت نیروگاه‌های جزر و مدی خود را افزایش داده‌اند. همچنین کشورهای در حال توسعه‌ای مانند چین و ایران نیز به این عرصه وارد شده‌اند. این نمودار حاکی از آن است که انرژی جزر و مدی نه تنها یک فناوری پایدار و سازگار با محیط زیست است، بلکه بستری برای رقابت جهانی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم کرده است. ایران با ورود به این حوزه می‌تواند در دهه‌های آینده نقش مهمی در توسعه این فناوری در منطقه ایفا کند، به‌ویژه اگر سیاست‌گذاری‌ها، سرمایه‌گذاری‌ها و تحقیقات علمی به‌صورت هدفمند هدایت شوند.

جدول ۱- نیروگاه‌های جزر و مدی
Table 1. Tidal power plants

نام نیروگاه	کشور	ظرفیت (مگاوات)	نوع	سال تأسیس	نیاز آینده
نیروگاه جزر و مد لارنس ^۱	فرانسه	۲۴۰	تک حوضچه‌ای و دو اثری	۱۹۹۶	گسترش ظرفیت و بهبود فناوری
نیروگاه آنابولیس	کانادا	۲۰	-	۱۹۸۴	افزایش ظرفیت و بهینه‌سازی
نیروگاه کیسلا یاگوبا	شوروی سابق	۰/۴	آزمایشی	۱۹۶۷	تحقیقات بیشتر در فناوری
نیروگاه جی انگ زی	چین	۳/۹	-	۱۹۸۰	توسعه و بهبود عملکرد
نیروگاه شیها ^۲	کره	۲۵۴	-	۲۰۱۱	گسترش و افزایش تولید
نیروگاه‌های انگلستان	انگلستان	۱/۲	-	۲۰۰۸	تحقیقات و توسعه در فناوری
نیروگاه‌های کره جنوبی	کره جنوبی	۱/۵	-	۲۰۰۹	بهینه‌سازی و افزایش ظرفیت
پروژه MeyGen	انگلستان	(۴۰۰ با ۶۱ توربین)	-	۲۰۱۸	تکمیل نصب و افزایش ظرفیت
نیروگاه جزر و مد ساسکاتون	کانادا	۵۰	جدید	۲۰۲۳	توسعه فناوری و کاهش هزینه‌ها
نیروگاه جزر و مد ریو	برزیل	۳۰	جدید	۲۰۲۳	تحقیق و توسعه در منطقه مناسب

در ایران، به‌ویژه در سواحل جنوبی مانند خلیج فارس، تنگه هرمز و دریای عمان، جریان‌های جزر و مدی قابل توجهی وجود دارد که پتانسیل بالایی برای تولید برق دارند. همچنین، سرعت متوسط جریان جزر و مدی در برخی مناطق بین ۱ تا ۲ متر بر ثانیه است و عمق آب در نواحی ساحلی معمولاً بین ۲۰ تا ۴۰ متر می‌باشد که برای نصب توربین‌های محور عمودی جریان جزر و مدی مناسب تلقی می‌شود. مناطقی مانند بندرعباس، چابهار، بوشهر، جاسک و خور موسی از جمله نقاط مستعد برای بهره‌برداری از انرژی جزر و مدی هستند. الگوی جزر و مدی در ایران ترکیبی از جزر و مد نیم‌روزانه و روزانه است و وجود نقاط مستعد در خلیج فارس تأثیر زیادی بر طراحی سیستم‌های انرژی جریان جزر و مدی دارد.

نوسانات جزر و مدی در منطقه بندر امام را نیز می‌توان عنوان کرد. در این منطقه توانایی تولید ۶۰ تا ۸۰ مگاوات انرژی الکتریکی تجدیدپذیر وجود دارد و از آنجا که مجتمع بندری امام خمینی (ره) و منطقه آزاد تجاری پتروشیمی نزدیک محل احداث این نیروگاه است، برق تولیدی خریداران خود را خواهد داشت.

ژنراتورهای جزر و مدی یکی از فناوری‌های نوین در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر هستند که از نیروی جزر و مد برای تولید برق استفاده می‌کنند. نیروگاه‌های جزر و مدی به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱. نیروگاه‌های سد جزر و مدی: این نیروگاه‌ها با ساخت سد در مناطق ساحلی، جریان آب را کنترل کرده و از اختلاف سطح آب برای تولید برق استفاده می‌کنند. ۲. توربین‌های جریان جزر و مدی: این توربین‌ها در بستر دریا نصب شده و از جریان‌های قوی آب برای تولید برق بهره می‌برند (European Marine Energy Centre, n.d., Nachtane et al., 2020, Greaves et al., 2018, Flambar et al., 2019, Sun & Huang, 2020, Kinsey & Dumas,

¹ La Rance

² Sihwa

(2018, Andersson et al., 2010). ۳. نیروگاه‌های تالاب جزر و مدی: این نیروگاه‌ها از تالاب‌های طبیعی برای ذخیره و استفاده از انرژی جزر و مدی بهره می‌گیرند.

جدول (۲) تولید و مصرف انرژی جهانی و سهم منابع تجدیدپذیر، از جمله انرژی جزر و مد، در سال ۲۰۲۵ را نشان می‌دهد.

شکل ۱- رشد ظرفیت نیروگاه‌های جزر و مدی (Renewable Energy World, 2024).

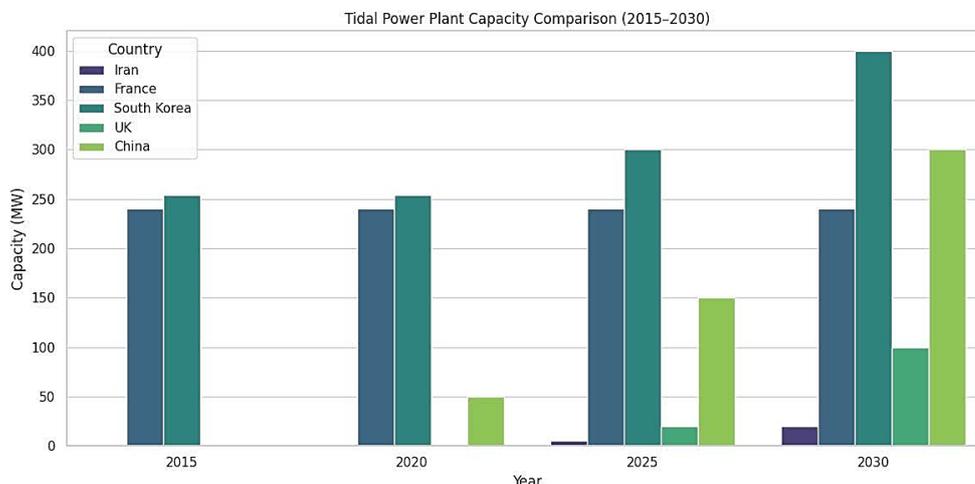


Fig 1. Capacity growth of tidal power plants (Renewable Energy World, 2024)

جدول ۲- تولید و مصرف انرژی جهانی و سهم منابع تجدیدپذیر (International Energy Agency, 2023; Renewable Energy World, 2024)

Table 2. Global energy production and consumption with share of renewable sources (International Energy Agency, 2023; Renewable Energy World, 2024)

نوع انرژی	مصرف (تراوات ساعت)	سهم مصرف (%)
سوخت‌های فسیلی	۹۶۰۰	۷۰
انرژی هسته‌ای	۲۶۰۰	۲۰
منابع تجدیدپذیر	۲۳۰۰	۱۰
انرژی خورشیدی	۱۳۰۰	۴
انرژی بادی	۷۰۰	۲/۵
انرژی آبی	۱۵۰	۱
انرژی جزر و مد	۵۰	۲
دیگر منابع	۵۰	۰/۵

انرژی جزر و مدی با توجه به پیش‌بینی‌پذیری بالا، پایداری و تأثیرات زیست‌محیطی کم، می‌تواند نقش مهمی در آینده انرژی پایدار ایران ایفا کند. لذا ساختار و اهداف این مقاله شامل موارد ذیل است:

اصول عملکرد، انواع مختلف ژنراتورها، مزایا و چالش‌ها.

بررسی پتانسیل انرژی جریان‌های جزر و مدی، چگالی توان و توربین‌های مورد استفاده در یک خور.

مبانی توربین‌های جریان دریایی و چگونگی استحصال توان از آن‌ها.

معرفی ژنراتور سنکرون آهنربای دائم (PMSG)^۱.

معرفی ماشین سوئیچ رلوکتانسی القایی (ISRM)^۱ برای کاربرد در استحصال انرژی جزر و مد (این معرفی برای اولین بار انجام شده است).

¹ Permanent Magnet Synchronous Generators

بررسی خطای اتصال کوتاه.

تفاوت‌های اصلی بین توربین بادی و توربین جزر و مدی.

سیستم ژنراتور/ذخیره‌ساز توربین جزر و مدی (فلاویل).

بررسی استراتژی‌های کنترل تحمل خطای سنسور برای توربین‌های جریان دریایی.

بررسی مطالعات اخیر در زمینه فناوری‌های استخراج انرژی جزر و مدی

۲- اصول عملکرد، انواع مختلف ژنراتورها، مزایا و چالش‌ها

از ژنراتورهای مورد استفاده در نیروگاه‌های جزر و مدی می‌توان به انواع مختلفی از جمله ژنراتورهای القایی، ژنراتورهای سویچ رلکتانس، ژنراتورهای سنکرون، ژنراتورهای آهنربای دائم و ژنراتورهای سویچ رلکتانس القایی اشاره کرد که به‌طور خاص برای استحصال توان از انرژی جزر و مد طراحی شده‌اند.

ژنراتورهای القایی:

به دلیل قابلیت کار در سرعت‌های متغیر، در سیستم‌های جریان آزاد و توربین‌های زیرآبی کاربرد گسترده‌ای دارند. توربین‌های جریان مستقیم نیز بدون نیاز به ذخیره‌سازی، انرژی جزر و مد را مستقیماً به برق تبدیل می‌کنند.

ژنراتورهای سویچ رلکتانس (SRG^2):

با طراحی ساده و استاتور سیم‌پیچی شده، از قابلیت اطمینان بالا و هزینه ساخت نسبتاً پایینی برخوردارند. کنترل جریان در این ژنراتورها آسان‌تر است، اما چالش‌هایی مانند ریپل گشتاور و نویز صوتی نیازمند طراحی و کنترل دقیق هستند (Fuglseth, 2005; Mansouri et al., 2004; Deglaire & Solum, 2009; Patil & Mehta, 2014; Pillay & Krishnan, 2002).

ژنراتورهای سنکرون:

این ژنراتورها برای تبدیل انرژی مکانیکی حاصل از جریان‌های جزر و مد به برق، مشابه آنچه در نیروگاه‌های سدی به کار می‌رود، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Zhou et al., 2014; Carbon Trust, 2014; Elzalabani et al., 2015; Myers & Bahaj, 2006).

ژنراتور سنکرون مغناطیس دائمی (PMSG):

این نوع ژنراتور، یک ژنراتور سنکرون با روتور مجهز به آهنرباهای دائمی است که نیاز به منبع تحریک جداگانه ندارد و ویژگی‌هایی همچون راندمان بالا، تلفات کم و پایداری عملکردی مطلوب را ارائه می‌دهد (European Marine Energy Centre, n.d.; Nachtane et al., 2020; Norhan et al., 2022). ساختار فشرده و سبک این ژنراتور، همراه با توان خروجی پایدار و قابلیت کنترل دقیق، آن را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی نظیر توربین‌های بادی، تولید برق دریایی و هوایی و سیستم‌های مستقل انرژی تبدیل کرده است. با این حال، هزینه بالای تولید ناشی از استفاده از مواد کمیاب در ساخت آهنرباها، یکی از چالش‌های اصلی این فناوری محسوب می‌شود.

ژنراتور سوئیچ رلکتانس القایی ($ISRG^3$):

به دلیل سادگی ساخت و هزینه پایین، در کاربردهای متنوعی از جمله خودروهای الکتریکی و هیبریدی، پمپ‌ها، فن‌ها و کمپرسورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ماشین‌ها به‌ویژه در سیستم‌های تهویه مطبوع به‌خاطر قابلیت کنترل دقیق سرعت و گشتاور، و همچنین در سیستم‌های دریایی و ژنراتورهای جریان جزر و مدی به دلیل کارایی و قابلیت اطمینان بالا، گزینه‌های جذابی

¹ Induction Switched Reluctance Machines

² Switched Reluctance Generator

³ Induction Switched Reluctance Generator

محسوب می‌شوند. همچنین می‌توان از این دسته ژنراتورها به‌عنوان نوآوری در عرصه توربوژنراتورهای جزر و مدی و به‌دلیل توان بالای آن‌ها نام برد (Abbasian & Hanaeinejad, 2016).

در جدول (۳)، مقایسه جامعی بین پنج نوع ژنراتور در زمینه کاربردهای انرژی جریان جزر و مدی ارائه شده است. برای برآورد هزینه ساخت این ژنراتورها، لازم است پارامترهایی همچون ظرفیت نامی، نوع کاربرد (صنعتی، تجدیدپذیر، آزمایشگاهی و غیره) و همچنین محل ساخت در نظر گرفته شوند. هزینه‌های اصلی معمولاً شامل مواد اولیه، سیم‌پیچی، آهنرباهای دائمی (در صورت استفاده)، ساخت بدنه و فرآیند مونتاژ اولیه می‌شوند. هزینه‌های مربوط به کنترلر، مبدل و نصب نیز عموماً به صورت جداگانه محاسبه می‌گردند.

۳- بررسی پتانسیل انرژی جریان‌های جزر و مدی، چگالی توان و توربین‌های مورد استفاده در یک خور

حرکت جزر و مدی باعث ورود و خروج حجم مشخصی از آب به دهانه رودخانه شده و جریان‌های افقی ایجاد می‌کند. این الگوها تحت تأثیر هندسه دهانه، ناهمواری بستر، نیروهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی شکل می‌گیرند و بر اکوسیستم‌های محلی اثر می‌گذارند. انتخاب محل مناسب برای احداث تأسیسات انرژی جزر و مدی نیازمند بررسی عواملی مانند دامنه جزر و مد، هندسه خور، چرخه جزر و مد، بار رسوبی، فاصله از امواج و ترافیک دریایی است. همچنین نزدیکی این تأسیسات به مراکز مصرف، هزینه‌های انتقال انرژی را کاهش می‌دهد (Khojasteh et al., 2021; Alvarez et al., 2017).

ژنراتورهای جزر و مدی با بهره‌گیری از نوسانات سطح آب و جریان‌های ناشی از جزر و مد، انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. این سیستم‌ها معمولاً شامل توربین‌هایی هستند که با حرکت آب به چرخش درآمده و الکتریسیته تولید می‌کنند (Kalogirou, 2013; Adcock et al., 2021). ژنراتورهای PMSG به دلیل راندمان بالا، حذف سیستم تحریک و قابلیت عملکرد در سرعت‌های متغیر، به‌طور گسترده در تولید انرژی تجدیدپذیر از جمله توربین‌های بادی، سامانه‌های دریایی و هوایی و نیروگاه‌های مستقل مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مزایای اصلی این ژنراتورها می‌توان به بازدهی بالا، وزن کم، ابعاد فشرده و قابلیت کنترل دقیق اشاره کرد. با این حال، هزینه بالای تولید ناشی از استفاده از آهنرباهای نادر، یکی از چالش‌های مهم این فناوری به شمار می‌رود.

توربین‌های جزر و مدی بر اساس ویژگی‌های طراحی به شش گروه اصلی تقسیم می‌شوند: توربین‌های محور افقی (شکل ۲ الف)، توربین‌های محور عمودی (شکل ۲ ب)، هیدروفویل‌های نوسانی (شکل ۲ ج)، سیستم‌های ونتوری یا محصورشده (شکل ۲ د)، پیچ‌های ارشمیدس (شکل ۲ ه)، بادبادک‌های جزر و مدی (شکل ۲ و). هر یک از این فناوری‌ها برای شرایط خاص جریان دریا مناسب بوده و قابلیت عملکرد در سرعت‌های پایین جریان را دارند (Flambard et al., 2019; Sun & Huang, 2020; Kinsey & Dumas, 2010; Andersson et al., 2018). جدول (۴) نیز توان خروجی این فناوری‌ها را مقایسه کرده است.

واحد دلتا استریم متشکل از سه توربین جزر و مدی با محور افقی و پره‌های ثابت است که روی ناسل‌های آهنی نصب شده و توسط جرثقیل‌های شناور در محل استقرار می‌یابند. این واحد دارای یک قاب فولادی مثلثی‌شکل با برج‌های پشتیبان در هر رأس است که عملکرد توربین‌ها را در شرایط مختلف جریان جزر و مدی بهینه می‌سازد (شکل ۳) (Freeman et al., 2009).

هر توربین قادر است در سرعت جریان ۲/۵ متر بر ثانیه، توانی معادل ۴۰۰ کیلووات تولید کند. ناسل‌ها به کمک مکانیزم انحراف هیدرولیکی در مسیر جریان قرار گرفته و در حالت پارک، به صورت عمود بر جهت جریان عمل می‌کنند. انرژی تولیدشده با ولتاژ ۶/۶ کیلوولت از طریق کابل زیردریایی به ساحل انتقال یافته و توسط تجهیزات ساحلی، فرآیندهای کنترل و تزریق انرژی به شبکه انجام می‌پذیرد (DeltaStream, 2013).

جدول ۳- مقایسه ژنراتورهای سویچ رلکتانس (SRG)، سویچ رلکتانس القایی (ISRG)، سنکرون، القایی، و سنکرون مغناطیس دائمی (PMSG) در کاربردهای انرژی جریان جزر و مدی

Table 3. Comparison of Switched Reluctance Generators (SRG), Induced Switched Reluctance Generators (ISRG), Synchronous Generators, Induction Generators, and Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) in tidal stream energy applications

ویژگی	ژنراتور سنکرون مغناطیس دائمی (PMSG)	ژنراتور القایی	ژنراتور سنکرون	ژنراتور سویچ رلکتانس القایی (ISRG)	ژنراتور سویچ رلکتانس (SRG)
ساختار روتور و استاتور	دارای آهنربای دائمی روی روتور	دارای سیم‌پیچ روی روتور	دارای سیم‌پیچ و آهنربای دائمی	دارای سیم‌پیچ روی روتور و استاتور	دارای سیم‌پیچ روی استاتور
ریپل توان / گشتاور خروجی	بسیار کم و پایدار	دارای گشتاور راه‌اندازی است.	گشتاور راه‌اندازی ندارد (به یک سیستم راه‌اندازی نیاز دارد).	دارای گشتاور راه‌اندازی است.	ریپل گشتاور از قطب‌های برجسته استاتور و روتور، و نویز صوتی، نیازمند کنترل پیشرفته
بهره‌وری انرژی	بسیار بالا	بالا	بالا	وابسته به طراحی، نیازمند تنظیم دقیق	بالا، مخصوصاً در سرعت‌های پایین
پاسخ دینامیکی	سریع و بهینه‌شده	کندتر، وابسته به تغییرات بار	پایدار و کنترل‌پذیر	سریع، قابلیت تنظیم دقیق	سریع، قابلیت تنظیم دقیق
نیازهای کنترلی	نیازمند الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته	وابسته به تنظیمات ولتاژ و فرکانس	سنسور موقعیت ضروری	کنترل مد جریان با هیستریزیس	کنترل مد جریان یا مد ولتاژ عملکرد بهینه
ضریب قدرت Power Factor	نزدیک به ۱	۰/۷ تا ۰/۹	می‌تواند در ضریب قدرت‌های متفاوت پس فاز یا پیش فاز و یا واحد کار کند.	بهینه شده با استراتژی‌های کنترلی	بهینه شده با استراتژی‌های کنترلی
هزینه ساخت	بالا به دلیل آهنربای دائمی و کیفیت مواد	متوسط، وابسته به ساختار، اقتصادی	بالا، نیازمند سیم‌پیچ و مواد خاص، مناسب برای توان بالا	متوسط، کاربردهای کم‌هزینه و انعطاف‌پذیر	متوسط، کاربردهای کم‌هزینه و انعطاف‌پذیر
متوسط توان خروجی در کاربردهای تولید انرژی جریان جزر و مدی	ایده‌آل برای تولید توان با راندمان بالا در فضاهای محدود، چند کیلو تا چند مگاوات	پرکاربرد در توربین‌های جزر و مدی و صنعتی، چند کیلو تا چند مگاوات	مناسب برای توربین‌های بزرگ در جریان‌های قوی، چند کیلو تا چند مگاوات	مناسب برای نیروگاه‌ها مخصوصاً جزر و مدی، چند کیلو تا چند مگاوات	مناسب برای توربین محور عمودی، مقاوم در برابر شرایط سخت، چند کیلو تا چند مگاوات
تحمل پذیری در برابر اتصال کوتاه	بالا، مناسب برای انرژی تجدیدپذیر	پایین، در برابر خطاهای اتصال کوتاه آسیب‌پذیرتر	متوسط	بسیار بالا	بسیار بالا
کنترل پذیری در شرایط بحرانی	کنترل‌پذیری خوب با مبدل‌های پیشرفته	کنترل‌پذیری محدود	پیچیده‌تر، نیازمند سنکرون‌سازی دقیق	قابل تنظیم	ساده و قابل اعتماد

شکل ۲- فناوری‌های توربین جزر و مدی شامل: الف) توربین محور افقی، ب) محور عمودی، ج) هیدروفویل نوسانی، د) ونتوری (یا پره محصور) توربین، ه) پیچ ارشمیدس، و) بادبادک جزر و مدی (Wagh, 2019; Burchell, 2018; Abd Rahim et al., 2023; Reddy et al., 2022; Jensen, 2019)

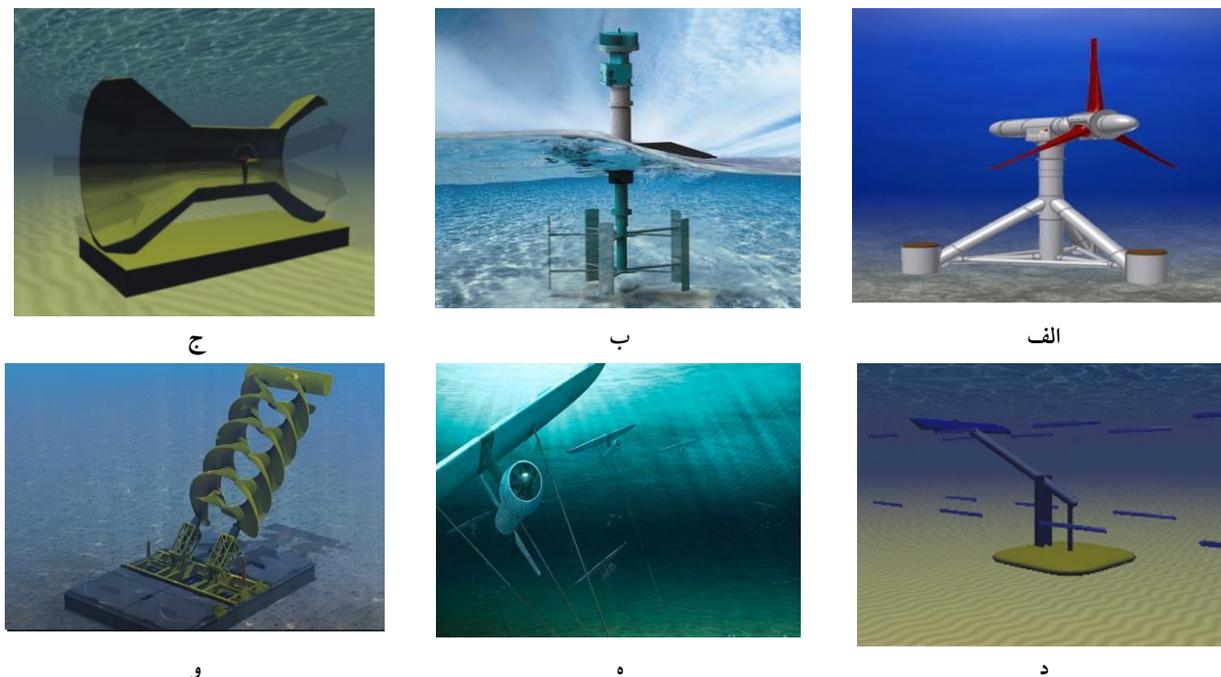


Fig 2. Tidal turbine technologies including: (a) horizontal-axis turbine, (b) vertical-axis turbine, (c) oscillating hydrofoil, (d) venturi (or ducted blade) turbine, (e) archimedes screw, and (f) tidal kite (Wagh, 2019; Burchell, 2018; Abd Rahim et al., 2023; Reddy et al., 2022; Jensen, 2019)

جدول ۴- فناوری‌های جریان دریایی و توان خروجی

Table 4. Marine current technologies and power output

توان خروجی تقریبی	مزیت کلیدی	کاربرد پیشنهادی	محل نصب	نوع فناوری
۱۰۰KW-۲MW	راندمان بالا در جریان‌های یکنواخت	صنعتی (سکوها‌های دریایی)	بستر دریا	توربین محور افقی
۵۰-۵۰۰ KW	مناسب برای جریان‌های متغیر	شهری/تحقیقاتی	مناطق کم عمق	توربین محور عمودی
۲۰۰-۱۰۰۰ KW	توان بالا در مساحت محدود	تأمین برق مستقل	جریان‌های سطحی	توربین بادبادکی
۱۰۰-۸۰۰ KW	تقویت طبیعی سرعت جریان	تولید برق در کانال‌ها	ورودی خلیج‌ها	توربین ونتوری
۳۰-۳۰۰ KW	طراحی نوآورانه و کم هزینه	پژوهشی/خانگی	جریان‌های کم سرعت	هیدروفویل نوسانی
۱۰۰KW-۲MW	نصب آسان و دسترسی بهتر	صنعتی (شبکه برق ساحلی)	نزدیک ساحل	سیستم شناور جزر و مدی

یک توربین جزر و مدی درایو مستقیم با قطر پره ۹ متر برای تولید توان ۱/۲ مگاوات شامل سه توربین یکسان است که به صورت موازی نصب شده و از ژنراتور سنکرون آهنربای دائم با قطب صاف بهره می‌برند. سیستم کنترلی نیز مبتنی بر کنترل ضریب توان و کنترل جریان پیاده‌سازی شده است، Zhou et al., 2014; Carbon Trust, 2014; Elzalabani et al., 2015; Myers & Bahaj, 2006). شکل (۴) طرح کلی توربین مبتنی بر PMSG و شکل (۵) فرآیند تبدیل انرژی جریان دریایی به انرژی الکتریکی متصل به شبکه را نشان می‌دهد. در پژوهش (Ghandi 2016). ابتدا توربین‌های جریان دریایی و معادلات مربوط به محاسبه توان آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است تا مکانیزم تبدیل انرژی جریان‌های جزر و مدی به انرژی الکتریکی به طور دقیق تبیین شود. در ادامه، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم برای این سیستم معرفی و ویژگی‌های عملکردی آن تحلیل شده است. همچنین راهبردهای کنترلی و تأثیر

پدیده تورم (Swell) بر سرعت جریان دریایی مورد بحث قرار گرفته است. این پدیده که تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم دارد، با استفاده از «مدل استوکس» و طیف «JONSWAP» شبیه‌سازی شده تا رفتار جریان‌های دریایی در شرایط مختلف به طور دقیق بررسی شود.

شکل ۳- واحد دلتا استریم (شامل قاب اصلی پایگاه، لوله افقی، راک پا (rock foot)، ناسل ژنراتور توربین آب، تیغه‌های توربین، سیستم کنترل انحراف هیدرولیک، برج (ماژول پایانی) (Freeman et al., 2009)

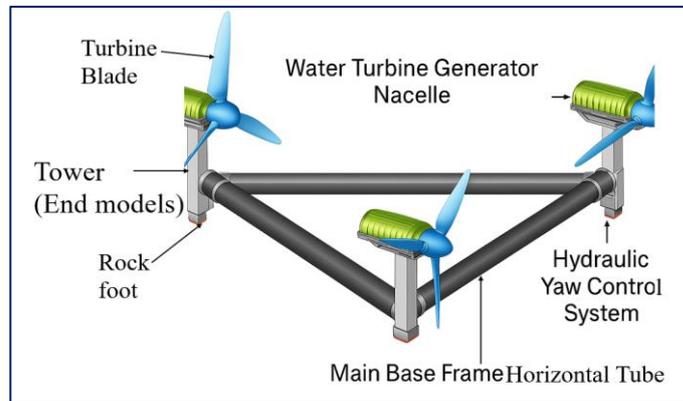


Fig 3. Delta-stream unit including: main base frame, horizontal pipe, rock foot, turbine generator nacelle, turbine blades, hydraulic yaw control system, and tower (end module) (Freeman et al., 2009)

شکل ۴- طرح کلی برای یک سیستم توربین جزر و مدی بر اساس PMSG (Zhou et al., 2014; Carbon Trust, 2014)

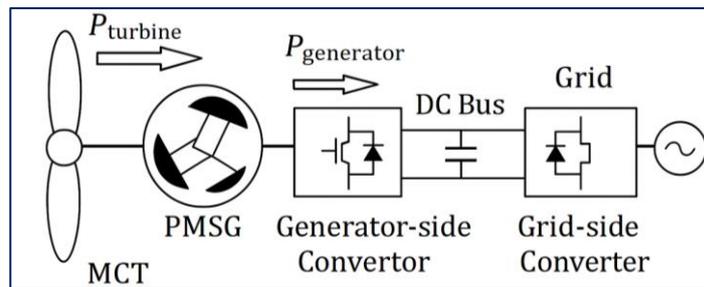


Fig 4. Schematic diagram of a tidal turbine system based on PMSG (Zhou et al., 2014; Carbon Trust, 2014)

شکل ۵- طرح کلی تبدیل انرژی جریان دریایی متصل به شبکه سیستم (Zhou, 2014)

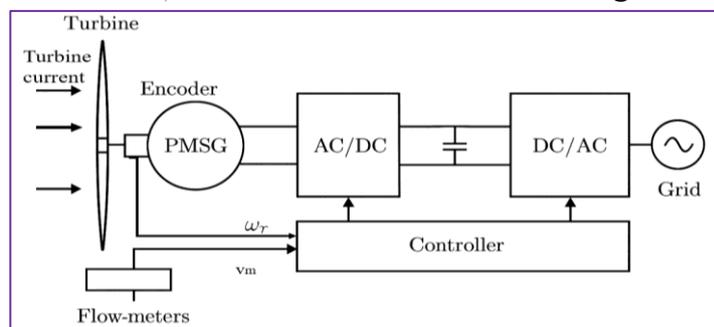


Fig 5. Schematic diagram of grid-connected marine current energy conversion system (Zhou et al., 2014)

۴- مبانی توربین‌های جریان دریایی و چگونگی استحصال توان از آن‌ها

دو روش اصلی برای تولید برق از انرژی جزر و مد وجود دارد:

- روش سدبندی (Barrage Method):

در این روش، با احداث سد در عرض خور یا خلیج، از اختلاف سطح آب بین حالت مد و جزر برای تولید برق استفاده می‌شود. این سیستم اگرچه انرژی پایدار تأمین می‌کند و قابلیت ذخیره‌سازی موقت آب را فراهم می‌آورد، اما با چالش‌هایی از جمله هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا و تأثیرات قابل توجه محیط‌زیستی روبرو است.

- روش جریان آزاد:

توربین‌های جریان آزاد با نصب در مناطق دارای جریان‌های جزر و مدی قوی، انرژی جنبشی آب را به برق تبدیل می‌کنند و عملکردی مشابه توربین‌های بادی دارند. انواع مختلفی از ژنراتورهای الکتریکی مانند القایی، سویچ رلکتانس، آهنربای دائم و سویچ رلکتانس القایی برای این سیستم‌ها قابل استفاده‌اند. انرژی جزر و مدی شامل دو جزء است: انرژی پتانسیل E_p و انرژی جنبشی E_k که توسط معادلات زیر تعریف می‌شوند (Zhou et al., 2014; Carbon Trust, 2014; Elzalabani et al., 2015; Myers & Bahaj, 2006):

$$E_p = \frac{1}{2} C_p(\lambda) g \rho A h^2 \quad (1)$$

$$E_p = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho A V_t^3 \quad (2)$$

$$E_t = E_p + E_k \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{R \omega r}{V_t} = \frac{4\pi}{n} \quad (4)$$

در روابط (۱) تا (۴) C_p ضریب توان و تابعی از نسبت سرعت نوک پره λ ، ρ چگالی آب دریا در جرم در هر واحد حجم، A مساحت تحت بررسی، G شتاب گرانش، R شعاع رتور توربین جزر و مدی، n تعداد تیغه رتور، w_r سرعت رتور توربین جزر و مدی و h دامنه جزر و مد و کل انرژی جزر و مدی E_t برای یک منطقه مشخص از دریا یا اقیانوس، از مجموع انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل به دست می‌آید. معادله ضریب توان نیز بصورت روابط (۵) و (۶) بیان می‌شود (Alvarez et al., 2017):

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 * \left[\frac{116}{A} - 0.4\beta - 5 \right] * e^{\frac{-21}{A}} + 0.0068\lambda \quad (5)$$

$$A = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

C_p ضریب توان، درصدی از توان مکانیکی است که می‌تواند از جریان سیال توسط توربین استخراج شود. این ضریب بر اساس قانون بتز دارای یک حد نظری $\left(\frac{16}{27}\right)$ است (Myers & Bahaj, 2006). برای استخراج حداکثر توان مکانیکی از جریان سیال، ضریب توان باید در مقدار بهینه $C_{pmax} = 0.45$ باشد که با نسبت سرعت نوک پره بهینه $\lambda = 6.3$ مطابقت دارد.

۵- معرفی ژنراتور سنکرون آهنربای دائم (PMSG)

ژنراتور PMSG مورد بررسی، یک آلترناتور سه‌فاز با آهنرباهای دائمی و مقاومت مغناطیسی بالا است که به دلیل حذف جریان القایی در رتور، از ساختاری ساده‌تر و بازده بالاتری برخوردار است. در این تحلیل، ژنراتور از طریق یک اینورتر PWM^1 به یک بانک باتری متصل شده است. در این پیکربندی، ولتاژ ترمینال ژنراتور (V_s) مستقیماً توسط ولتاژ باس DC (V_{dc}) که معادل ولتاژ دو سر

¹ Pulse-Width Modulation

باتری است کنترل می‌شود. ارتباط بین V_s و V_{dc} از طریق معادله تعادل توان قابل تبیین است و نشان‌دهنده وابستگی مستقیم ولتاژ خروجی ژنراتور به شرایط ولتاژ در سمت DC سیستم می‌باشد (رابطه ۷).

$$3V_s I_s = V_{dc} I_{dc} \quad (۷)$$

در این مدل، I_s جریان استاتور AC، V_s ولتاژ استاتور AC، I_{dc} جریان DC و V_{dc} ولتاژ DC می‌باشد. PMSG با یک مدل DC نمایش داده شده و جریان در روتور بر اساس محورهای d و q بیان می‌گردد که در آن محور d در راستای شار آهنربای دائمی (PM) قرار دارد. معادلات مدل ریاضی PMSG در روابط (۸) تا (۱۲) ارائه شده است (Fuglseth, 2005; Mansouri et al., 2004; Deglaire & Solum, 2009; Patil & Mehta, 2014; Pillay & Krishnan, 2002):

$$V_d^s = -r_s i_d^s + d\phi_d^s/dt - w_s \phi_q^s \quad (۸)$$

$$V_q^s = -r_s i_q^s + d\phi_q^s/dt + w_s \phi_d^s \quad (۹)$$

$$V_0^s = -r_s i_0^s + d\phi_0^s/dt \quad (۱۰)$$

$$\Phi_d^s = -L_d^s i_d^s + \phi_{af}^m \quad (۱۱)$$

$$\Phi_q^s = -L_q^s i_q^s \quad (۱۲)$$

در اینجا $V_{d,q}^s$ ولتاژهای محور d و q ، $i_{d,q}^s$ جریان‌ها و $\Phi_{d,q}^s$ شارهای پیوندی هستند. ϕ_{af}^m نشان‌دهنده شار پیوندی ناشی از آهنرباهای دائمی روتور است که با استاتور پیوند دارد. r_s مقاومت سیم‌پیچ استاتور و L_d^s اندوکتانس پیوندی استاتور می‌باشد. w_s سرعت زاویه‌ای الکتریکی (فرکانس اینورتر) است که با w_r از طریق رابطه $w_r = \rho \cdot w_s$ مرتبط می‌شود، که در آن ρ تعداد جفت قطب‌ها است. سرعت زاویه‌ای الکتریکی w_s را می‌توان به صورت رابطه (۱۳) تعریف کرد:

$$dw_s/dt = T_m - T_e \cdot P/J \quad (۱۳)$$

در این رابطه، J ممان اینرسی، T_m گشتاور مکانیکی اعمال شده از سمت توربین بر روی شفت، و T_e گشتاور الکتریکی تولیدشده توسط ژنراتور است.

۶- توپولوژی ماشین سویچ رلکتانس القایی (ISRM)

ماشین ISRM نوعی ماشین رلکتانس متغیر با تحریک تک‌تکی است که از استاتور و روتور ساخته شده از ورقه‌های فولاد فرومغناطیسی M-19 تشکیل شده است. سیم‌پیچ‌های استاتور به صورت متمرکز بر روی قطب‌های داخلی قرار گرفته‌اند، در حالی که هادی‌های روتور که به صورت اتصال کوتاه هستند، با گام کوتاه به دور هر قطب پیچیده شده‌اند. این ماشین با اتصال سری فازها، یک سیستم سه‌فاز تشکیل می‌دهد و در پیکربندی‌های مختلفی نظیر ۱۲/۱۰، ۸/۶ و ۱۲/۸ طراحی می‌شود (Abbasian & Hanaeinejad, 2016; Jazi et al., 2021).

هادی‌های روی روتور ISRM یک مسیر کم‌مقاومت برای شار مغناطیسی ایجاد کرده و در نتیجه گشتاور بالایی تولید می‌کنند. با این حال، این هادی‌ها باعث ایجاد تلفات مس قابل توجه و تولید گرما نیز می‌شوند. شکل (۶) یک ISRM با ساختار ۸:۶ را نشان می‌دهد که دارای سیم‌پیچ‌های استاتور با گام کامل (a, b, c, d) و سیم‌پیچ روتور با گام کامل (O, R, S) است. در حالت عدم هم‌پوشانی قطب‌ها، فاصله هوایی زیاد بوده و اشباع مغناطیسی در قطب‌های استاتور و روتور رخ نمی‌دهد؛ بنابراین اندوکتانس فاز مستقل از جریان در نظر گرفته می‌شود. اما در حالت هم‌پوشانی کامل، فاصله هوایی کاهش یافته و هسته وارد ناحیه

اشباع می‌شود. با صرف نظر کردن از اندوکتانس متقابل بین فازها، می‌توان معادلات ولتاژ هر فاز استاتور (رابطه ۱۴) را به صورت مستقل استخراج کرد (Daneshi et al., 2025; Abbasian, 2020; Madani Mohammadi et al., 2023).

$$U_k = R \cdot i_k + d\lambda_k(i_k, \theta) / dt \quad (14)$$

در این رابطه، i_k جریان تحریک فاز، U_k ولتاژ فاز استاتور، R مقاومت سیم‌پیچ و λ_k شار پیوندی استاتور ناشی از جریان سیم‌پیچ K است.

شکل ۶- ISRM دارای ساختار ۸:۶ با سیم‌پیچ‌های گام کامل استاتور^۱ (a, b, c, d) و سیم‌پیچ گام کامل روتور (O, R, S)

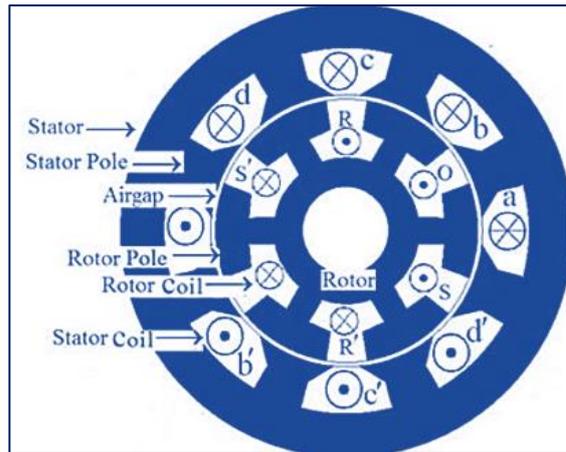


Fig 6. ISRM with 8:6 structure featuring (a, b, c, d) full-pitch stator windings and (O, R, S) full-pitch rotor windings

ماشین ISRM به دلیل حذف آهنربای دائم، هزینه ساخت کمتر و عملکرد حرارتی بهتر در محیط‌های دریایی، گزینه‌ای مطلوب برای توربین‌های جریان دریایی محسوب می‌شود. این ماشین در سرعت‌های پایین و متوسط، بازدهی بالاتری نسبت به ماشین‌های رلکتانس متعارف داشته و گشتاور بیشتری نیز در مقایسه با ماشین‌های آهنربای دائم داخلی (IPM^۲) تولید می‌کند. قابلیت کنترل بالا و سازگاری با راهبردهای تحمل خطا، ISRM را به گزینه‌ای قابل اطمینان در سامانه‌های انرژی جزر و مدی تبدیل کرده است (Ghandi et al., 2025).

شکل‌های (۷) تا (۱۰) نشان می‌دهند که ماشین سویچ رلکتانس القایی از نظر عملکردی بر ماشین‌های سویچ رلکتانس معمولی (SRM^۳) و ماشین‌های آهنربای دائم داخلی برتری دارد. در جریان ۲۰۰ آمپر، ISRM گشتاوری معادل ۴۰۰ نیوتن‌متر تولید می‌کند، در حالیکه این مقدار برای SRM تنها ۲۰۰ نیوتن‌متر است. همچنین چگالی گشتاور ISRM حدود ۵۰ نیوتن‌متر بر لیتر است که در مقایسه با چگالی ۳۸ نیوتن‌متر بر لیتر SRM، مقدار بالاتری را نشان می‌دهد. علاوه بر این، راندمان ISRM در سطوح مختلف توان خروجی، بالاتر از دو ماشین دیگر بوده و در برخی شرایط عملکردی حتی از IPM نیز پیشی می‌گیرد. این ویژگی‌های متمایز، ISRM را به گزینه‌ای مناسب و رقابتی برای استفاده در سامانه‌های انرژی جزر و مدی تبدیل کرده است.

¹ Stator Full Pitch Windings

² Interior Permanent Magnet machine

³ Switched Reluctance Machines

شکل ۷- مقایسه گشتاور ISRM با SRM در جریان ۱۰۰ آمپر

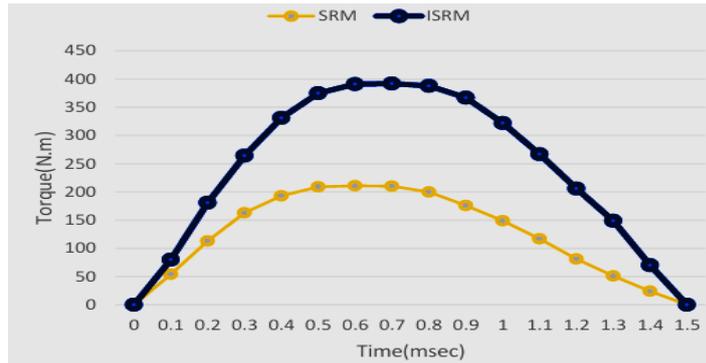


Fig 7. Torque comparison between ISRM and SRM at 100 A current

شکل ۸- مقایسه چگالی گشتاور ISRM با SRM در جریان‌های فاز متفاوت (Jazi et al., 2021)

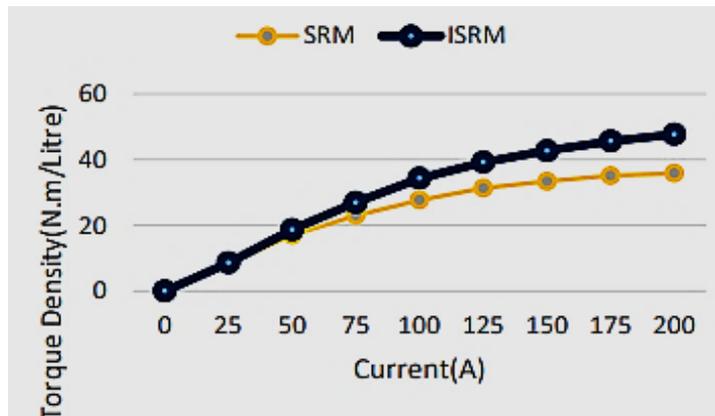


Fig 8. Torque density comparison between ISRM and SRM at different phase currents (Jazi et al., 2021)

شکل ۹- مقایسه راندمان ISRM با ماشین سوئیچ رلکتانس معمولی در توان‌های خروجی متفاوت (Jazi et al., 2021)

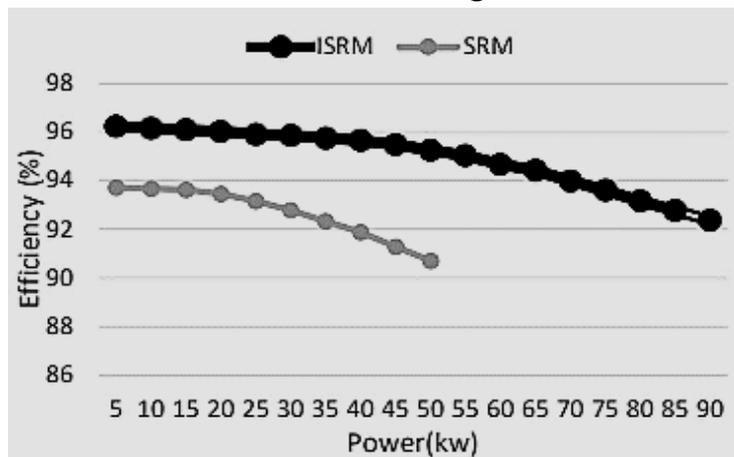


Fig 9. Efficiency comparison between ISRM and conventional switched reluctance machine at different output power levels (Jazi et al., 2021)

شکل ۱۰- مقایسه راندمان سویچ رلکتانس القایی در مقایسه با ماشین آهنربای دائم داخلی (Daneshi et al., 2025)

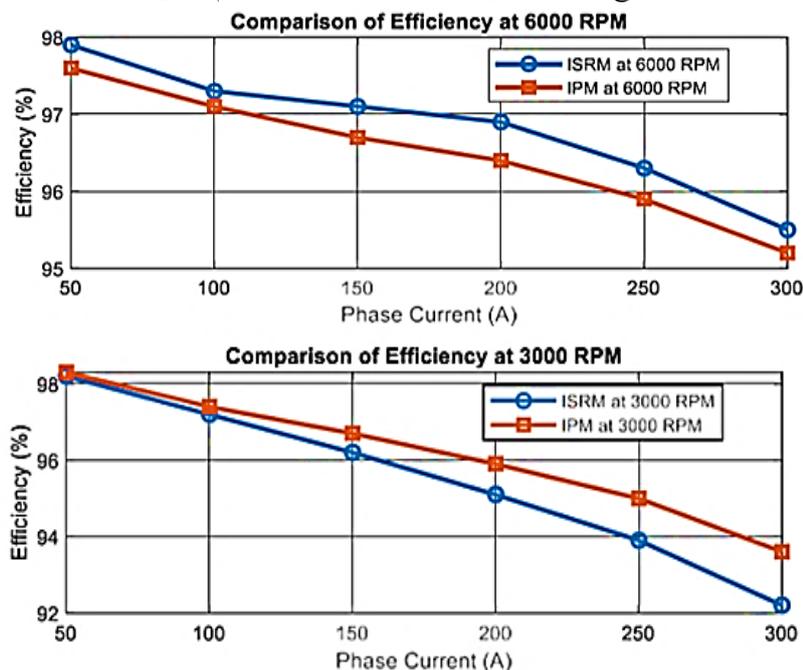


Fig 10. Efficiency comparison of Induction Switched Reluctance Machine versus Interior Permanent Magnet Machine (Daneshi et al., 2025)

۷- بررسی خطای اتصال کوتاه

توربین‌های جزر و مدی در معرض خرابی‌های ناشی از شرایط سخت دریایی و آب‌وهوایی هستند. خطاهای شبکه، به‌ویژه اتصال کوتاه، سهم قابل توجهی در این خرابی‌ها دارند (برای مثال، این مقدار در ایسلند ۳۷٪ گزارش شده است). انواع متداول این خطاها شامل اتصال کوتاه خط به زمین، خط به خط، خط به زمین، و اتصال کوتاه سه‌فاز است. مدت زمان تداوم خطا به عملکرد سیستم‌های حفاظتی بستگی دارد و معمولاً در بازه چند صد میلی‌ثانیه قرار می‌گیرد. این خطاها منجر به تغییرات شدید ولتاژ شبکه می‌شوند که دامنه آن بین ۱۰ تا ۹۰ درصد مقدار نامی نوسان دارد. شکل (۱۱) انواع مختلف خطاهای شبکه را نشان می‌دهد که شامل: خطای اتصال کوتاه یک‌خط به زمین (شکل ۱۱-الف)، خطای اتصال کوتاه خط به خط (شکل ۱۱-ب)، خطای اتصال کوتاه خط به خط به زمین (شکل ۱۱-ج)، و خطای اتصال کوتاه سه‌فاز (شکل ۱۱-د) می‌باشد (Benbouzid et al., 2015). این نوع خطاها معمولاً به‌صورت افت ولتاژ یا اضافه‌ولتاژ در شبکه ظاهر می‌شوند (Benbouzid et al., 2014). خطاهای اتصال کوتاه در شبکه برق می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد توربین‌های دریایی داشته باشند. از جمله این تأثیرات می‌توان به افزایش جریان استاتور، آسیب به عایق سیم‌پیچ ژنراتور، و افزایش شدید ولتاژ پیوند DC اشاره کرد که در موارد حاد می‌تواند منجر به شکست باس DC و جداسازی ژنراتور از شبکه شود. علاوه بر این، این خطاها می‌توانند ناپایداری سیستم، افزایش ریپل شبکه، اعوجاج هارمونیک جریان، و افت کیفیت توان تزریقی شوند که در نهایت عملکرد کلی توربین‌های دریایی را با اختلال مواجه می‌سازد (Zhang et al., 2009; Mullane et al., 2005; Endrejat & Pillay, 2009). برای تضمین تداوم عملکرد توربین‌های دریایی پس از رخداد خطا، روش‌های عبور از افت ولتاژ (LVVRT¹) به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها عموماً در دو دسته اصلی قرار می‌گیرند:

- روش مبتنی بر تجهیزات کمکی: این رویکرد شامل استفاده از سیستم ذخیره‌سازی انرژی، محافظ کروب (Crowbar) و ادوات FACTS² است که به کاهش اثرات ناشی از خطا کمک می‌کنند (Deswal et al., 2010).

¹ Low Voltage Ride-Through

² Flexible AC Transmission Systems

- روش مبتنی بر کنترل مقاوم: این رویکرد بر طراحی الگوریتم‌های کنترلی مقاوم در برابر خطا تمرکز دارد که امکان حفظ پایداری سیستم را حتی در شرایط خطا فراهم می‌سازد (Zhou et al., 2013).

شکل ۱۱- (الف) خطای اتصال کوتاه خط به زمین، (ب) خطای اتصال کوتاه خط به خط، (ج) خطای اتصال کوتاه خط به خط زمین، (د) خطای اتصال کوتاه سه فاز مدار (Benbouzid et al., 2015)

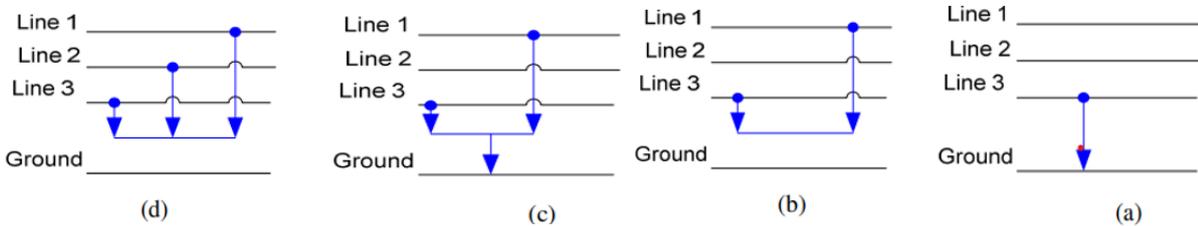


Fig 11. (a) Line-to-ground short circuit fault, (b) Line-to-line short circuit fault, (c) Line-to-line-to-ground short circuit fault, (d) Three-phase short circuit fault (Benbouzid et al., 2015)

۸- تفاوت‌های کلیدی بین توربین بادی و توربین جزر و مدی

پژوهش Winter (2011) تفاوت‌های کلیدی بین توربین‌های بادی و توربین‌های جزر و مدی را بررسی می‌کند. اگرچه هر دو سیستم هدف مشترکی در استخراج انرژی از سیالات دارند، اما تفاوت در چگالی و سرعت جریان سیال، عملکرد متفاوتی را برای آن‌ها به همراه دارد. چگالی آب دریا (حدود ۱۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب) به مراتب بیشتر از چگالی هوا است و در نتیجه انرژی جنبشی بیشتری را فراهم می‌کند. توربین‌های بادی دور از ساحل معمولاً با سرعت متوسط ۱۵ متر بر ثانیه و توربین‌های ساحلی با ۱۲ متر بر ثانیه کار می‌کنند، در حالی که سرعت جریان‌های جزر و مدی عموماً بین ۲ تا ۳/۵ متر بر ثانیه است و در برخی مناطق خاص حتی به ۱/۱۱ متر بر ثانیه نیز می‌رسد. این جریان‌ها رفتاری سینوسی با دامنه و فرکانس متغیر دارند که به ویژگی‌های جغرافیایی هر منطقه وابسته است. از نظر شرایط محیطی، توربین‌های بادی در معرض بادهای حاوی گرد و غبار و بقایای حشرات قرار دارند که می‌توانند عملکرد آیرودینامیکی پره‌ها را کاهش داده و در مواردی تا بیش از ۵۰٪ باعث تلفات توان شوند (Corten & Veldkamp, 2001). در مقابل، توربین‌های جزر و مدی با چالش رشد زیستی در محیط زیر آب مواجه هستند؛ از جمله تجمع جلبک‌ها، گیاهان دریایی و صدف‌ها که پاکیزگی و بازدهی پره‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اگرچه هنوز تجربه عملیاتی گسترده‌ای در این زمینه وجود ندارد، حفظ سطح پره‌ها از آلودگی در هر دو نوع توربین از اهمیت حیاتی برخوردار است. شکل (۱۲) نمونه‌ای از یک توربین جزر و مدی را قبل از استقرار و نیز پس از بازیابی و بررسی بعد از دو سال نشان می‌دهد.

شکل ۱۲- توربین جزر و مدی: (الف) قبل از استقرار؛ (ب) بازیابی شده پس از ۲ سال (Corten & Veldkamp, 2001)



Fig 12. Tidal turbine: a) Before deployment; b) Recovered after 2 years (Corten & Veldkamp, 2001)

۹- سیستم ژنراتور/ذخیره‌ساز توربین جزر و مدی (Fly Wheel)

شکل (۱۳) مدل تجربی مجموعه ژنراتور/موتور القایی مورد استفاده در توربین جزر و مدی را نشان می‌دهد. در این مدل، شفت دوار سروموتور که نقش توربین جزر و مدی را شبیه‌سازی می‌کند، از طریق یک کلاچ یک طرفه به ماشین القایی (ژنراتور/موتور) متصل می‌شود. ماشین القایی نیز توسط یک مبدل/اینورتر دوطرفه مبتنی بر^۱ IGBT کنترل می‌گردد. توان تولیدی این سیستم را می‌توان با کنترل فرکانس اینورتر به سرعت تنظیم کرد (Chaudhari et al., n.d.).

زمانیکه ماشین القایی توسط اینورتر به گونه‌ای کنترل شود که با سرعت چرخش بالاتری نسبت به سروموتور (توربین شبیه‌سازی شده) کار کند، کلاچ مربوط به سروموتور قطع شده و ماشین القایی در حالت موتور عمل می‌کند. در این حالت، انرژی جنبشی دورانی که تابعی از مجذور سرعت چرخش است مشابه یک سیستم ذخیره‌سازی چرخ‌پره (Flywheel) ذخیره می‌شود. این انرژی ذخیره شده را می‌توان با کاهش تدریجی سرعت و کنترل مناسب اینورتر، بازیابی و به شبکه بازگرداند. این رویکرد، قابلیت و انعطاف‌پذیری سیستم را برای جبران نوسانات توان به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

شکل ۱۳- مدل تجربی ژنراتور/موتور القایی توربین جزر و مدی (Chaudhari et al., n.d.)



Fig 13. Experimental model of induction generator/motor for tidal turbine (Chaudhari et al., n.d.)

بنابراین، نیاز به توسعه یک الگوریتم کنترل^۲ MPPT (ردیابی نقطه حداکثر توان) بدون حسگر احساس می‌شود که وابسته به اندازه‌گیری سرعت جریان جزر و مدی و سرعت چرخش نباشد. کنترل MPPT بدون سنسور، با استفاده از روش‌هایی مانند رگرسیون بردار پشتیبان (SVR^۳)، امکان مقایسه و استخراج رابطه بین حداکثر توان خروجی و سرعت چرخش ژنراتور را فراهم می‌کند. عملکرد SVR شدیداً تحت تأثیر انتخاب پارامترهای آن است که در مرحله آموزش آفلاین بهینه می‌شوند. روش SVR در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی، از عملکرد و پاسخ بهتری برخوردار است؛ چرا که این روش همگرایی به حداقل سراسری را تضمین کرده و از گیر افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند (Abo-Khalil & Alghamdi, 2021). در همین راستا، Yin & Zhao (2019) یک سیستم تولید انرژی جزر و مدی متصل به شبکه با راندمان بالا، مبتنی بر ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم و مبدل پشت‌به‌پشت پیشنهاد دادند. همچنین یک توربین جزر و مدی ۱۵۰ کیلوواتی با انتقال هیدرواستاتیک و کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی طراحی کردند. این کنترل‌کننده با بهره‌گیری از پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت سرعت جریان جزر و مدی، تولید انرژی را بهینه می‌سازد. نتایج نشان داد که این روش منجر به افزایش ۶۷ درصدی میانگین توان خروجی ژنراتور در مقایسه با کنترل‌کننده‌های کلاسیک غیرپیش‌بینی می‌شود.

۱۰- بررسی استراتژی‌های کنترل تحمل خطای سنسور برای توربین‌های جریان دریایی

پژوهش (Pham et al., 2017) به بررسی قابلیت انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های تبدیل انرژی تجدیدپذیر دریایی پرداخته و بر اهمیت تحمل خطا و انعطاف‌پذیری در مواجهه با چالش‌های آب‌وهوایی و هزینه‌های بالای نگهداری تأکید می‌کند. در این زمینه،

^۱ Insulated-Gate Bipolar Transistor

^۲ Maximum Power Point Tracking

^۳ Support Vector Regression

مطالعاتی در زمینه تحمل خرابی سنسورها در کاربردهای توربین‌های جریان دریایی ارائه شده است. مقایسه‌های تحقیقاتی برای ارزیابی عملکرد راهبردهای کنترل تحمل‌پذیر خطا بر اساس معیارهایی همچون بازده انرژی، رپیل‌های گشتاور (که منجر به فرسودگی شفت توربین می‌شوند)، هزینه محاسباتی و مقاومت در برابر تغییرات پارامترها انجام گرفته است. این پژوهش‌ها مبتنی بر شبیه‌سازی‌های انجام‌شده روی یک توربین جریان دریایی با درایو مستقیم و ژنراتور سنکرون آهنربای دائم در "راز دو سین"^۱ در فرانسه است. از سوی دیگر، پدیده افزایش سطح دریا ناشی از تغییرات آب‌وهوایی (SLR)^۲ تأثیرات قابل توجهی بر هیدرودینامیک خورها و منابع انرژی جزر و مدی دارد. عواملی همچون منشور جزر و مدی، الگوی جریان و شکل دهانه رودخانه در تشدید یا کاهش این تأثیرات نقش دارند (Toumi et al., 2020). پژوهش‌های Smith & lee (2025) و Wang & Patel (2025) به بررسی پیشرفت‌های اخیر در زمینه ژنراتورهای انرژی جزر و مدی می‌پردازند. این مطالعات طراحی‌های نوآورانه و عملکرد ژنراتورهای جریان جزر و مدی را تحلیل کرده و پارامترهای کلیدی مانند بازده انرژی، تأثیرات محیطی و هزینه‌های عملیاتی را مورد ارزیابی قرار می‌دهند.

۱۱- بررسی مطالعات اخیر در زمینه فناوری‌های استخراج انرژی جزر و مدی

نتایج پژوهش Driscoll et al. (2024) و Norhan et al. (2022) نشان داد که انرژی جزر و مدی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای تولید سوخت‌های پاک و پایدار، به‌ویژه در مناطقی با پتانسیل بالای جریان‌های جزر و مدی، مورد استفاده قرار گیرد. نویسندگان همچنین بر اهمیت تحلیل‌های پایداری سامانه‌ای و برنامه‌ریزی دقیق زمانی در بهره‌برداری از این منابع انرژی تأکید کرده‌اند.

Yamanouchi et al. (2024) در زمینه ژنراتورهای خطی برای استخراج انرژی از جریان‌های جزر و مدی، طراحی نوآورانه‌ای را معرفی کرده‌اند که از آرایش هال‌باخ چندلایه و آهنرباهای ابرسانای دمای بالا (HTS)^۳ بهره می‌برد. این طراحی با هدف افزایش چگالی شار مغناطیسی و بهبود توان خروجی در سرعت‌های پایین توسعه یافته و به‌ویژه برای کاربرد در شرایط جریان‌های جزر و مدی مناسب ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از HTS به‌جای آهنربای دائمی متعارف، منجر به افزایش سه‌برابری توان خروجی شده است.

علاوه بر این، یکی از راهکارهای نوین در بهینه‌سازی مبدل‌های انرژی جزر و مدی، استفاده از سامانه‌های انتقال توان با نسبت سرعت متغیر پیوسته (IVT)^۴ است. در این راستا، پژوهش Li & Zhu (2024) با طراحی یک کنترل‌کننده حلقه‌بسته برای تنظیم نسبت انتقال توان، عملکرد مبدل انرژی جریان جزر و مدی را در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد این سامانه با کاهش نوسانات جریان تا بیش از ۹۱ درصد و حفظ سرعت مطلوب با خطای کمتر از ۲/۵۶ درصد، بهره‌وری تبدیل انرژی را به‌ویژه در سرعت‌های پایین و گشتاورهای بالا به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

از سوی دیگر، در حوزه تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، ژنراتورهای دائم‌مغناطیس مستقیم‌گردان به‌دلیل حذف گیربکس و کاهش نیاز به تعمیرات، گزینه‌ای مناسب محسوب می‌شوند. با این حال، یکی از چالش‌های مهم در این ماشین‌ها، بروز خطای دمغناطیس‌شدگی است که می‌تواند به کاهش شار مغناطیسی و در نهایت خرابی کامل منجر شود. در پژوهش Gyftakis et al. (2023) به بررسی جنبه‌های بحرانی این نوع خطا در ژنراتورهای چندمرحله‌ای پرداخته شده است. یافته‌ها نشان داد که برخلاف دمغناطیس‌شدگی غیریکنواخت، نوع یکنواخت آن فاقد امواج هارمونیکی قابل تشخیص است. این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های تجربی روی

¹ Raz de Sein

² Sea Level Rise

³ High-Temperature Superconducting

⁴ Infinitely Variable Transmission

ژنراتور C-GEN، تأثیر این خطا را بر شاخص‌های هارمونیک، توزیع فضایی شار و جریان‌های گردشی بین مراحل مختلف تحلیل کرده است.

در ادامه، رویکردهای نوینی برای بهبود عملکرد سیستم‌های تولید انرژی جزر و مدی مطرح شده است. یکی از مطالعات شاخص در این زمینه، پژوهشی است که توسط *Andriniriniamalaza & Murad, (2024)* انجام شده و استفاده از یک کنترل‌کننده نوروفازی را برای بهینه‌سازی ولتاژ خروجی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) مورد بررسی قرار داده است. در این مطالعه، با مقایسه دو الگوریتم^۱ MPPT یکی مبتنی بر نسبت سرعت نوک پره (TSR^2) و دیگری مبتنی بر منطق نوروفازی نشان داده شد که رویکرد نوروفازی به‌طور مؤثری نوسانات ولتاژ را کاهش داده و پایداری سیستم را در بارهای مقاومتی - سلفی افزایش می‌دهد.

از سوی دیگر، کنترل سرعت توربین جزر و مدی با محور افقی در مطالعه *Benbouzid et al. (2012)* مورد بررسی قرار گرفته است. این روش بر روی یک توربین آزمایشی با قطر ۱/۴۴ متر و توان ۷/۵ کیلووات آزمایش شده و داده‌های جریان جزر و مدی از منطقه *Raz de Sein* جمع‌آوری شده‌اند. شکل (۱۴) نمودار تغییرات سرعت جریان جزر و مدی در عمق‌های مختلف آب را نشان می‌دهد. مقدار مرجع سرعت با استفاده از استراتژی MPPT (ردیابی نقطه حداکثر توان) تعیین شده است. شکل (۱۵) توان تولیدشده توسط ژنراتور القایی دوطرفه (DFIG^۳) و سرعت چرخش روتور آن را نشان می‌دهد، در حالی که شکل (۱۶) مربوط به توان تولیدشده و سرعت چرخش روتور در ژنراتور سنکرون با آهنربای دائم (PMSG) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توربین‌های جزر و مدی با محور افقی به‌خوبی عمل کرده و قادر به دستیابی به حداکثر توان خروجی هستند. در این مطالعه، ژنراتور PMSG عملکرد بهتری نسبت به ژنراتور DFIG نشان داده است.

شکل ۱۴- تغییرات سرعت جریان جزر و مدی در عمق‌های مختلف آب (Benbouzid et al., 2012)

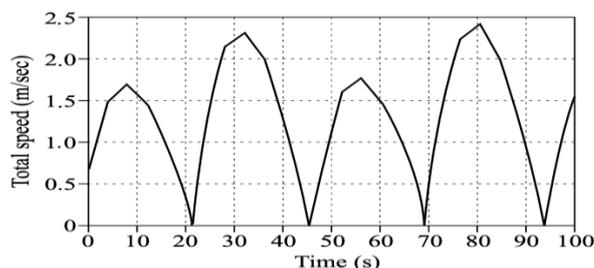


Fig 14. Tidal flow velocity variation at different water depths (Benbouzid et al., 2012)

شکل ۱۵- توان تولیدشده و سرعت چرخش روتور در ژنراتور القایی دوسویه (DFIG) (Benbouzid et al., 2012)

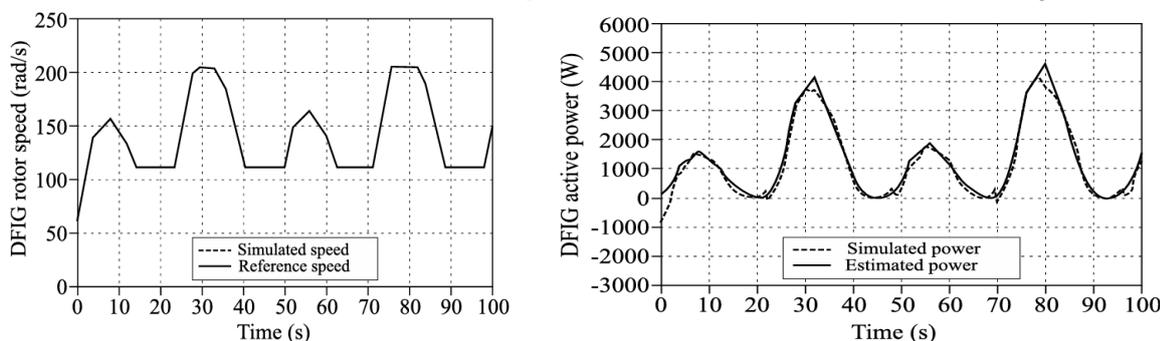


Fig 15. Generated power and rotor rotational speed in Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) (Benbouzid et al., 2012)

¹ Maximum Power Point Tracking

² Tip-Speed Ratio

³ Doubly-Fed Induction Generator

شکل ۱۶- توان تولیدشده و سرعت چرخش روتور در ژنراتور سنکرون با آهنربای دائم (PMSG) (Benbouzid et al., 2012).

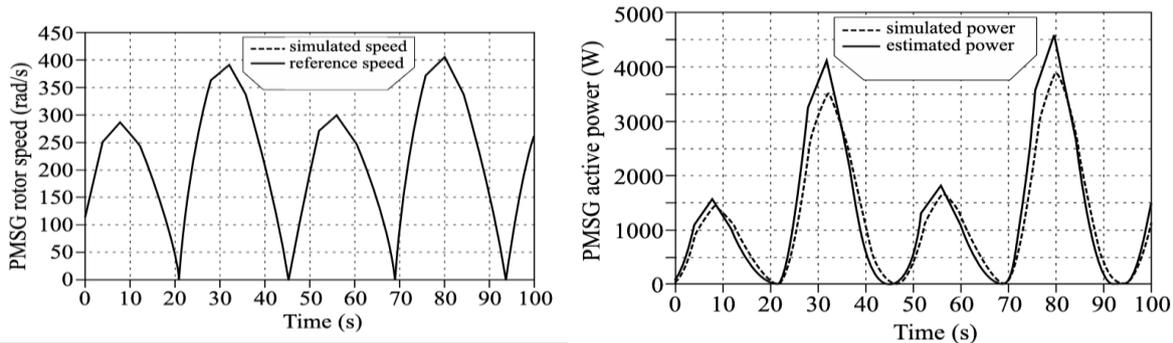


Fig 16. Generated power and rotor rotational speed in Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) (Benbouzid et al., 2012)

۱۲- نتیجه‌گیری

صنعت انرژی جریان دریایی در مسیر تحول و نوآوری سریع قرار دارد. انرژی جزر و مد که به عنوان منبعی پاک و تجدیدپذیر شناخته می‌شود، ظرفیت بالایی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی دارد. این مطالعه با بررسی انواع ژنراتورها از جمله ژنراتورهای القایی، سویچ رلکتانس، آهنربای دائم و سویچ رلکتانس القایی و همچنین تحلیل چالش‌های فنی مرتبط، بر اهمیت توسعه فناوری‌های نوین مانند ژنراتورهای سویچ رلکتانس القایی تأکید می‌کند. از دیگر موارد بررسی شده در این پژوهش می‌توان به مبانی توربین جریان دریایی، سیستم ژنراتور/ذخیره‌ساز توربین جزر و مدی (فلایویل)، استراتژی‌های کنترل عملکرد تحمل خطای سنسور برای کاربردهای توربین جریان دریایی و تفاوت‌های اصلی بین توربین‌های جریانی و توربین‌های بادی اشاره کرد. با در نظر گرفتن یافته‌های پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که ژنراتورهای سویچ رلکتانس القایی، با مزایای قابل توجهی از جمله هزینه ساخت کمتر، بازده و گشتاور خروجی بالاتر در مقایسه با ژنراتورهای سویچ رلکتانس معمولی و ژنراتورهای آهنربای دائم، گزینه‌ای امیدوارکننده و مناسب برای بهره‌برداری در مزارع توربین‌های جریان دریایی محسوب می‌شوند. این پژوهش با بررسی جامع چالش‌های فنی، استراتژی‌های کنترل و ارائه جدول مقایسه‌ای، چارچوب ارزشمندی را برای انتخاب و بهینه‌سازی فناوری‌های کلیدی در زمینه توسعه پایدار انرژی جزر و مدی فراهم می‌کند. برای دستیابی به آینده‌ای پایدار، سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه، ارتقای دانش فنی و تقویت همکاری میان تمامی ذینفعان این حوزه ضروری است تا انرژی جزر و مد بتواند به‌طور مؤثر در سبد انرژی ایران جایگاه مناسبی پیدا کند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

این نسخه خطی توسط همه نویسندگان تهیه و بررسی شده است.

- Abbasian, M. (2020). Induction switched reluctance motor (U.S. Patent No. US20170370296A1).
- Abbasian, M., & Hanaeinejad, V. (2016). Induction switched reluctance machine for wind power conversion. In 2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA) (pp. 1-4). IEEE.
- Abd Rahim, M. W., Rahman, A. A., Izham, M., & Amin, N. A. M. (2023). Tidal energy in Malaysia: An overview of potentials, device suitability, issues and outlook. *Regional Studies in Marine Science*, 61, 102853. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102853>
- Abo-Khalil, A. G., & Alghamdi, A. S. (2021). MPPT of permanent magnet synchronous generator in tidal energy systems using support vector regression. *Sustainability*, 13(4), 2223. <https://doi.org/10.3390/su13042223>
- Adcock, T. A. A., Draper, S., Willden, R. H. J., & Vogel, C. R. (2021). The fluid mechanics of tidal stream energy conversion. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 53, 287–310. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060207>
- Alvarez, M., Carballo, R., Ramos, V., & Iglesias, G. (2017). An integrated approach for the planning of dredging operations in estuaries. *Ocean Engineering*, 140, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.05.014>
- Andersson, J., Hellsmark, H., & Sandén, B. A. (2018). Shaping factors in the emergence of technological innovations: The case of tidal kite technology. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 191–208. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.034>
- Andriniriniamalaza, F. P., & Murad, N. M. (2024). Neuro-fuzzy control on a permanent magnet synchronous generator for a vertical tidal turbine to improve output voltage. In 2024 1st International Conference on Smart Energy Systems and Artificial Intelligence (SESIAI) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SESIAI61023.2024.10599409>
- Benbouzid, M. E. H., Beltran, B., Amirat, Y., Yao, G., Han, J., & Mangel, H. (2014). Second-order sliding mode control for DFIG-based wind turbines fault ride-through capability enhancement. *ISA Transactions*, 53(3), 827–833. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.01.006>
- Benbouzid, M. E. H., Mueen, M. S., & Khoucha, F. (2015). An up-to-date review of low-voltage ride-through techniques for doubly-fed induction generator-based wind turbines. *International Journal on Energy Conversion*, 3(1), 1–9.
- Benbouzid, M., Astolfi, J. A., Bacha, S., Charpentier, J. F., Machmoum, M., Maître, T., & Roye, D. (2012). Concepts, modeling and control of tidal turbines. *Marine Renewable Energy Handbook*, 219-278. <https://doi.org/10.1002/9781118603185.ch8>
- Burchell, J. W. (2018). Advancement of direct drive generator systems for offshore renewable energy production (Doctoral dissertation, University of Edinburgh). *ERA Edinburgh*. <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/33263>
- Carballo, R., Iglesias, G., & Castro, A. (2009). Numerical model evaluation of tidal stream energy resources in the Ría de Muros (NW Spain). *Renewable Energy*, 34(6), 1517–1524. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.028>
- Chaudhari, V. V., Chaudhari, A. P., Mahajan, G. K., & Khandare, N. M. (2016). Electricity generation by using wind and tidal turbine for power fluctuation compensation. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(4), 200–204. <https://www.irjet.net/archives/V3/i4/IRJET-V3I4200.pdf>
- Corten, G. P., & Veldkamp, H. F. (2001). Insects can halve wind power. *Nature*, 412(6842), 41-42. <https://doi.org/10.1038/35084154>
- Daneshi, M., Abbasian, M., & Delshad, M. (2025). Comparison of an induction switched reluctance machine with an interior permanent magnet machine using finite element method. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 62-68. <https://doi.org/10.13052/2025.ACES.J.400108>
- Deglaire, S. E. P., & Solum, A. (2009). Simulation and control of direct driven permanent magnet synchronous generator (PMSG). Uppsala University.
- DeltaStream. (2013). The core design principles and intellectual property. Tidal Energy Limited. Tidal turbine system. *International Patent Application WO 2010/007342 A2*.
- Deswal, S. S., Dahiya, R., & Jain, D. K. (2010). Ride-through alternatives of adjustable speed drives (ASD's) during fault conditions. In 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2010.5712416>
- Driscoll, H., Palazzi, C., & Bañares-Alcántara, R. (2024). The role of tidal stream energy in green ammonia and hydrogen production in the English Channel. In *Oceans 2024-Halifax* (pp. 1-4). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/OCEANS55160.2024.10753662>

- Carbon Trust (2014). UK Tidal Current Resource and Veatch. Retrieved from: <http://www.carbontrust.com>
- Elzalabani, M., Fahmy, F. H., Nafeh, A. E. S. A., & Allam, G. (2015). Modelling and simulation of tidal current turbine with permanent magnet synchronous generator. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 13(1), 57-64. <https://doi.org/10.11591/telkommika.v13i1.7017>
- Endrejat, F., & Pillay, P. (2009). Ride-through of medium voltage synchronous machine compressor drives *In Proceedings of the 2009 IEEE IEMDC, Miami, USA* (pp. 909–915). <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2009.5075312>
- European Marine Energy Centre. (n.d.). Retrieved February 15, 2021. <http://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-devices/>
- Flambard, J., Amirat, Y., Feld, G., Benbouzid, M., & Ruiz, N. (2019). River and estuary current power overview. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 365. <https://doi.org/10.3390/jmse7100365>
- Freeman, C., Amaral Teixeira, J., Trarieux, F., & Ayre, R. (2009). Design of a gravity stabilised fixed pitch tidal turbine of 400kW. In Proc. *Eighth European Wave and Tidal Energy Conf.*, Uppsala, Sweden (pp. 1-9).
- Fuglseth, T. P. (2005). Modelling a 2.5 MW direct driven wind turbine with permanent magnet generator. Department of Electrical Power Engineering, Norwegian University of Science and Technology, NO-7491 Trondheim, Norway.
- Ghandi, N. (2016). Design and analysis of a tidal power plant with a rated power of one megawatt (MW) [Master's thesis, MA University]. (In Persian).
- Ghandi, N., Saghafi, H., & Abbasian, M. (2025). Analysis of an oil-spray cooling system for an induction switched reluctance machine using computational fluid dynamics. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 40(6).
- Greaves, D., Iglesias, G., & Wiley, J. (Eds.). (2018). Wave and tidal energy. John Wiley & Sons Limited. <https://doi.org/10.1002/9781119014492>
- Gyftakis, K. N., Skarmoutsos, G. A., Barajas-Solano, I., Burchell, J., & Mueller, M. (2023). Critical aspects of demagnetization faults in multi-stage direct drive permanent magnet generators for renewables. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(6), 6655–6663. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3299905>
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Renewable energy market update 2023*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2023>
- Jazi, M. A., Abbasian, M., & Gerling, D. (2021). Preliminary evaluation of induction switched reluctance machine (ISRM) for electric vehicle application. *IEEE Access*, 10, 26693-26701. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3084892>
- Jensen, M. J. (2019). Deep Green tidal kite energy system [Photograph]. *Science Photo Library*. <https://sciencephotogallery.com/featured/deep-green-tidal-kite-energy-system-mikkel-juul-jensen--science-photo-library.html>
- Kalogirou, S. A. (2013). Solar energy engineering: Processes and systems (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397270-5.00001-0>
- Khojasteh, D., Glamore, W., Heimhuber, V., & Felder, S. (2021). Sea level rise impacts on estuarine dynamics: A review. *Science of The Total Environment*, 780, 146470. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146470>
- Kinsey, T., & Dumas, G. (2010). Testing and analysis of an oscillating hydrofoils turbine concept. In *Fluids Engineering Division Summer Meeting* (Vol. 49484, pp. 9-22). <https://doi.org/10.1115/FEDSM-ICNMM2010-30869>
- Li, G., & Zhu, W. (2024). Control and flume flow experiments of a tidal current energy converter with an infinitely variable transmission. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 29(4), 2803–2811. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2024.3398534>
- Madani Mohammadi, A., Abbasian, M. A., Delshad, M., & Saghafi, H. (2023). Electromagnetic and thermal analysis of a 6/4 induction switched reluctance machine for electric vehicle application. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 361–370. <https://doi.org/10.13052/2023.ACES.J.380509>
- Mansouri, M. N., Mimouni, M. F., Benghanem, B., & Annabi, M. (2004). Simulation model for wind turbine with asynchronous generator interconnected to the electric network. *Renewable energy*, 29(3), 421-431. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00225-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00225-8)
- Mullane, A., Lightbody, G., & Yacamii, R. (2005). Wind turbine fault ride-through enhancement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(4), 1929–1937. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.857390>

- Myers, L., & Bahaj, A. S. (2006). Power output performance characteristics of a horizontal axis marine current turbine. *Renewable energy*, 31(2), 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.022>
- Nachtane, M., Tarfaoui, M., Goda, I., & Rouway, M. (2020). A review on the technologies, design considerations and numerical models of tidal current turbines. *Renewable Energy*, 157, 1274–1288. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.155>
- Norhan, M. I. D. M., Salim, N. A., Yasin, Z. M., & Mohamad, H. (2022). Tidal energy system based on tidal stream generator with the implementation of permanent magnet synchronous generator. In *2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPEA53519.2022.9744662>
- Patil, K., & Mehta, B. (2014). Modeling and control of variable speed wind turbine with permanent magnet synchronous generator. In *2014 International Conference on Advances in Green Energy (ICAGE)* (pp. 258-264). IEEE. <https://doi.org/10.13140/2.1.1499.6800>
- Pham, H. T., Bourgeot, J. M., & Benbouzid, M. E. H. (2017). Comparative investigations of sensor fault-tolerant control strategies performance for marine current turbine applications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 43(4), 1024-1036. <https://doi.org/10.1109/28.25541>
- Pillay, P., & Krishnan, R. (2002). Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. I. The permanent-magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on industry applications*, 25(2), 265-273. <https://doi.org/10.1109/28.25541>
- Reddy, K. B., Bhosale, A. C., & Saini, R. P. (2022). Performance parameters of lift-based vertical axis hydrokinetic turbines – A review. *Ocean Engineering*, 266(Part 4), 113089. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113089>
- Renewable Energy World. (2024). The future of tidal energy: Opportunities and challenges. Retrieved from <https://www.renewableenergyworld.com/tidal-energy/the-future-of-tidal-energy>
- Sahoo, S. K., Sinha, A. K., & Kishore, N. K. (2018). Control techniques in AC, DC, and hybrid AC–DC microgrid: A review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(2), 738–759. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2786588>
- Sen, S., & Kumar, V. (2018). Microgrid control: A comprehensive survey. *Annual Reviews in Control*, 45, 118–151. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.04.012>
- Smith, J., & Lee, A. (2025). Advancements in tidal energy generators: A comprehensive review. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 16(2), 123–134. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2025.1234567>
- Sun, J., & Huang, D. (2020). Numerical investigation on aerodynamic performance improvement of vertical-axis tidal turbine with super-hydrophobic surface. *Ocean Engineering*, 217, 107995. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107995>
- Toumi, E. S., Elbouchikhi, M., & Benbouzid, Y. (2020). Grid fault-resilient control of a PMSG based tidal stream turbine. *Journal of Electrical Systems*, 16(4), 429-447.
- Wagh, A. (2019, December 12). Canadian Digby County to produce electricity through tidal turbines. *Energetica India*. <https://www.energetica-india.net/news/canadian-digby-county-to-produce-electricity-through-tidal-turbines>
- Wang, R., & Patel, M. (2025). Innovative designs and performance analysis of tidal stream generators. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 50(1), 45–56.
- Winter, A. I. (2011). Differences in fundamental design drivers for wind and tidal turbines. In *OCEANS 2011 IEEE-Spain* (pp. 1-10). IEEE. <https://doi.org/10.1109/Oceans-Spain.2011.6003647>
- Yamanouchi, Y., Tsuchiya, M., Koga, R., Yamaguchi, K., Izumi, M., & Ida, T. (2024). Conceptual design of a linear power generator for undulator-type tidal current power generation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34(3), 1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3370136>
- Yin, X., & Zhao, X. (2019). ADV preview based nonlinear predictive control for maximizing power generation of a tidal turbine with hydrostatic transmission. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(4), 1781–1791. <https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2938062>
- Zhang, L., Cai, X., & Guo, J. (2009). Dynamic response of DFIG fault currents under constant AC excitation condition. In *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918303>

Zhou, Z., Sculler, F., Charpentier, J. F., Benbouzid, M. E. H., & Tang, T. (2013). Power smoothing control in a grid-connected marine current turbine system for compensating swell effect. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(3), 816–826. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2251918>

Zhou, Z., Sculler, F., Charpentier, J. F., Benbouzid, M. E. H., & Tang, T. (2014). Power control of a nonpitchable PMSG-based marine current turbine at overrated current speed with flux-weakening strategy. *IEEE journal of oceanic engineering*, 40(3), 536-545. <https://doi.org/10.1109/JOE.2014.2356936>