

## مدل سازی دینامیکی پیل سوختی و کنترل پیش بین مبدل واسط از نوع IBVM در مود جریانی، جهت استفاده در سامانه های تولید توان پراکنده

علی عبداللهی ارجنکی<sup>۱</sup>، آرش دهستانی کلاگر<sup>۲\*</sup>، محمدرضا علیزاده پهلوانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۷)

### چکیده

پیل سوختی به عنوان یک منبع تولید انرژی کارآمد و سازگار با محیط زیست، اخیراً به طور گسترده ای مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، یک مدل جامع از پیل سوختی غشاء تبادل پروتون ۶ kW که شامل مدل دینامیکی همراه با مدل الکتریکی می باشد، ارائه می شود. تعادل جرمی و تعادل انرژی ترمودینامیکی، تغییرات دمایی، ولتاژ خروجی مدار باز، تلفات ولتاژ و لایه دوتایی بار الکتریکی در پیل سوختی مدل سازی می شوند. برای اتصال پیل سوختی به ریزشبه ها در کاربردهایی نظیر سامانه های تولید توان پراکنده، سیستم قدرت سامانه های پدافندی دریایی و شناورهای نظامی به مبدل هایی با بهره ولتاژ بالا، توانایی بالا در پردازش توان و سطح بالایی از جریان جذب شده از منبع DC نیاز می باشد. بنابراین در این مقاله، دو مبدل DC-DC افزایشنده درهم تنیده و مبدل افزایشنده درهم تنیده همراه با چند برابر کننده ولتاژ (IBVM) جهت اتصال پیل سوختی به ریزشبه ها پیشنهاد می شود. سپس روش کنترل پیش بین به عنوان یک کنترل کننده حالت جریانی، برای هر دو مبدل پیشنهادی به منظور کنترل جریان تزریقی توسط پیل سوختی و همچنین صاف کردن نوسانات خروجی پیل سوختی طراحی می شود. در مقایسه با روش های کنترل خطی آبخاری مرسوم، روش پیشنهادی از تنظیم کردن پارامترهای PID، مدولاسیون PWM و تبدیل مختصات جلوگیری می کند. در نهایت، نتایج شبیه سازی جهت اعتبارسنجی مدل ارائه شده، کارایی مبدل های انتخابی و روش کنترل پیشنهادی ارائه می شوند.

**کلیدواژه ها:** پیل سوختی، مدل سازی دینامیکی، مبدل DC-DC، کنترل حالت جریانی، کنترل پیش بین مبتنی بر مدل

## Dynamic Modeling of Fuel Cell and Model Predictive Control of Interface IBVM Converter in Current Mode for the Application of Distributed Power Generation

A. Abdollahi Arjanaki, A. Dehestani Kolagar\*, M. R. Alizadeh Pahlavani

\* Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 28/10/2020; Accepted: 24/08/2020)

### Abstract

The fuel cell, as an efficient and environmentally friendly energy source, has received much attention in recent years. In this paper, a comprehensive model of the 6-kW proton exchange membrane (PEM) fuel cell, including dynamic model along with the electrical model, is presented. The mass balance and thermodynamic energy balance, temperature dynamics, open-circuit output voltage, voltage losses, and the formation of charge double layer in the PEM fuel cell are modeled. The connection of fuel cells to the microgrids in applications such as distributed power generation, power systems of naval defense systems, and military ships requires DC-DC power converters with high voltage gain, high capability of power processing, and high levels of current absorbed from the dc source. In this context, this paper proposes the use of an interleaved boost DC-DC converter and an interleaved boost with voltage multiplier converter (IBVM) to connect the fuel cell to the microgrids. Then a model predictive control algorithm is proposed for the two proposed converter as a current-mode controller to control the injected current by fuel cell as well as to smooth output fluctuations of the fuel cell. Compared with traditional cascade linear control, the proposed scheme avoids PID parameters tuning, PWM modulation, and coordinate transformation. The simulation results are given to confirm the effectiveness of the proposed control method, the chosen converters, and the obtained model of PEM fuel cell.

**Keywords:** Fuel Cell, Dynamic Modeling, DC-DC Converter, Current Mode Control, Model Predictive Control

## ۱- مقدمه

گسترش روزافزون سامانه‌های تولید پراکنده و منابع تولید توان تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت کشورهای مختلف و به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر در کنار منابع مرسوم در سیستم‌های قدرت، ساختار جدیدی به نام ریزشبکه را معرفی کرده است که از آن به عنوان ساختار آینده سیستم‌های توزیع یاد می‌شود. در واقع یک ریزشبکه عبارت است از یک سیستم توزیع شامل منابع تولید پراکنده و ادوات ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی که مجموعه‌ای از بارهای الکتریکی مسکونی، تجاری، صنعتی و نظامی را تغذیه می‌کند [۷].

تاکنون، ساختارهای بسیاری از پیل سوختی با در نظرگیری مواد مختلف برای الکترولیت‌ها و الکترودها، کاتالیست‌ها و دماهای عملکردی مختلف ارائه شده است. در حال حاضر، شش نوع پیل سوختی اصلی وجود دارد که عبارتند از: پیل سوختی قلیایی<sup>۲</sup> (AFC)، پیل سوختی کربنات مذاب<sup>۳</sup> (MCFC)، پیل سوختی اسید فسفریک<sup>۴</sup> (PAFC)، پیل سوختی غشاء تبادل پروتون (PEMFC)<sup>۵</sup>، پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)<sup>۶</sup> و پیل سوختی مستقیم متانول (DMFC)<sup>۷</sup> [۸].

در میان انواع پیل سوختی، پیل سوختی PEM به دلیل ویژگی‌هایی نظیر چگالی توان بالا، الکترولیت جامد، دمای عملکردی پایین (۵۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)، راه‌اندازی سریع، نسبت توان به وزن مطلوب، عمر طولانی پیل سوختی و خوردگی کم، بهترین انتخاب می‌باشد. بازده پیل سوختی عموماً بین ۴۰ تا ۶۰ درصد است [۹].

تا به امروز، سیستم‌های PEMFC در بسیاری از زمینه‌ها، نظیر سیستم‌های تولید توان پراکنده، سیستم‌های توان ترکیبی PV/Wind/PEMFC، صنایع میکروالکترونیک، منابع تغذیه قابل حمل و پشتیبان، خودروهای الکتریکی، ترامواها، لوکوموتیوها، صنایع دریایی، صنایع نظامی، سامانه‌های پدافندی دریایی، شناورهای نظامی سطحی و زیرسطحی، هواپیماهای جاسوسی، مصارف خانگی و تجاری، توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۰-۱۱].

به‌طور کلی، دو رویکرد رایج برای مدل‌سازی پیل سوختی، مدل‌سازی دینامیکی و مدل‌سازی حالت ماندگار می‌باشد. مدل حالت ماندگار رابطه بین ولتاژ و جریان را به دست می‌آورد و به دو حالت تحلیلی و تجربی دسته‌بندی می‌شود. مدل‌های پیچیده پیل سوختی که بر اساس معادلات الکتروشیمیایی می‌باشند، توسط

با کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و افزایش فزاینده مشکلات آلودگی زیست محیطی، توسعه انرژی پاک تبدیل به موضوعی محبوب برای محققان شده است. فناوری پیل سوختی به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌ها برای تولید انرژی پاک و کارآمد، در طی چند دهه اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۱]. بازده مناسب، عدم آلودگی صوتی و زیست محیطی، چگالی انرژی بالا، قابلیت اطمینان بالا و ساختار ساده از مزایای پیل سوختی می‌باشند. این مزایا علاوه بر مدولار بودن پیل سوختی، آن را برای کاربردهای تولید پراکنده مناسب می‌سازد [۲].

اخیراً کاهش اثرات منفی زیست محیطی حمل و نقل دریایی و بهبود بهره‌وری انرژی در شناورهای سطحی و زیرسطحی، توجه محققان را به خود جلب کرده است. این نگرانی با اعمال مقررات زیست محیطی سختگیرانه‌تری توسط سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO)<sup>۱</sup> برای کنترل انتشار آلاینده‌های شناورها افزایش یافته است. این موضوع باعث شده است تا به توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر در صنایع دریایی پرداخته شود. همچنین اخیراً تلاش‌های زیادی برای توسعه شناورهای الکتریکی انجام شده است. در سامانه‌های پیشران ترکیبی در شناورها، از پیل سوختی می‌توان به عنوان منبع اصلی تولید توان استفاده کرد. نصب پیل سوختی کربنات مذاب بر روی شناور نروژی، وایکینگ لیدی، اثبات عملکرد مناسب شناورهای هیدروژنی که محرک اصلی آن‌ها پیل سوختی است، می‌باشد [۳-۴].

فناوری پیل سوختی به دلیل داشتن مزایایی از قبیل راندمان بالا، قابلیت اطمینان بالا، آلاینده‌گی کم، نیاز به تعمیر و نگهداری کم، بی‌صدا بودن و نداشتن هیچ‌گونه ارتعاش نامطلوب و حرارت پایین گازهای خروجی (انتشار تشعشعات و علائم مادون قرمز ناچیز) سبب توسعه پیل سوختی در کاربردهای نظامی با رویکرد پدافند غیرعامل نظیر سامانه‌های پدافندی دریایی، شناورهای نظامی سطحی، زیردریایی‌ها و سامانه‌های رانش دریایی شده است. همچنین پیل‌های سوختی که در دمای پایین کار می‌کنند در تانک‌ها، وسایل نقلیه زره‌پوش، خودروهای نظامی و زیردریایی‌ها استفاده می‌شوند. نداشتن قطعه متحرک در این نوع پیل‌های سوختی باعث کاهش صدا و ارتعاشات نامطلوب شده و به دلیل کارکرد در حرارت پایین و عدم وجود آلاینده‌گی‌های شیمیایی، ردیابی آن‌ها مشکل‌تر از سامانه‌هایی با موتور درون سوز می‌باشد [۵-۶].

<sup>۲</sup> Alkaline fuel cell<sup>۳</sup> Molten Carbonate fuel cell<sup>۴</sup> Phosphoric Acid fuel cell<sup>۵</sup> Proton Exchange Membrane fuel cell<sup>۶</sup> Solid Oxide fuel cell<sup>۷</sup> Direct Methanol fuel cell<sup>۱</sup> International Maritime Organization

وجود دارد، این مبدل‌ها دارای بازده پایین هستند [۲۱]. بیشتر مبدل‌های DC-DC که تا الان معرفی شده‌اند، دارای مشکل جریان‌های پالسی ورودی و خروجی، که منجر به سطح تداخل بالا می‌شود، می‌باشند. همان‌طوری‌که اشاره شد، در کاربردهای پیل سوختی مبدل‌های با ریپل جریان ورودی و خروجی کم ارجحیت دارند [۲۲]. بنابراین، برای غلبه بر این مشکل می‌توان از مبدل با ساختار درهم‌تنیده<sup>۱</sup> استفاده کرد. استفاده از این ساختار برتری‌هایی نظیر کاهش سطح نوسانات خروجی، بازده بهتر، کاهش تنش و استرس اجزا و عملکرد حرارتی بهتر را شامل می‌شود. همچنین چگالی توان بالا به آسانی به دست خواهد آمد [۲۳]. در [۲۴-۲۵]، نویسندگان روش‌های مختلفی به منظور دستیابی به بهره‌های ولتاژ بالا با مبدل‌های غیرایزوله پیشنهاد کرده‌اند. مراجع [۲۴، ۲۶]، به منظور دستیابی به بهره‌های ولتاژ بالا استفاده از مبدل‌های DC-DC سری شده با یکدیگر را پیشنهاد کرده‌اند؛ این راه‌حل با افزایش تعداد اتصال سری، بازده کل را کاهش می‌دهد. استفاده از سلف‌های کوپل‌شده جایگزین دیگری به منظور دستیابی به بهره‌های ولتاژ بالا است. با این وجود، کوپلینگ نامناسب بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه منجر به ازدیاد اندوکتانس نشی می‌شود. این موضوع استرس‌های ولتاژی بالایی را بر روی نیمه‌هادی‌ها ایجاد می‌کند [۲۷]. در [۲۸]، یک مدار مهاری فعال به منظور محدود کردن استرس‌های ولتاژی به کار رفته است که از آسیب‌رسیدن به عناصر نیمه‌هادی جلوگیری می‌کند. متأسفانه مدارات مهاری فعال، خود به مولفه‌های اضافی نظیر نیمه‌هادی‌ها، خازن‌ها و سلف‌ها نیاز دارند. در [۲۹]، یک مبدل افزایشنده با بهره ولتاژ بالا برای کاربردهای مرتبط با پیل سوختی به کار گرفته شده است. در این مبدل با استفاده از سلف کوپل‌شده سه سیم‌پیچ و مدار دو برابر کننده ولتاژ، بدون مقادیر بالای دوره عملکرد، بهره ولتاژ بالا به دست می‌آید. فناوری مهارکننده تلفات غیرفعال، علاوه بر این که انرژی نشی را به منظور بهبود بازده مبدل بازیابی می‌کند، پالس‌های ولتاژی بالا را نیز با هدف محدود کردن استرس ولتاژ کاهش می‌دهد. یک مبدل افزایشنده جدید با بهره ولتاژ بالا نیز در [۳۰] معرفی شده است. این مبدل از کلیدهای دوطرفه، سلف‌های کوپل‌شده سه سیم‌پیچ و دو سلول چند برابر کننده ولتاژ جهت دستیابی به بهره ولتاژ بالا تشکیل شده است. کلیدهای دوطرفه استرس جریان و ولتاژ را بر روی نیمه‌هادی‌ها کاهش می‌دهند، در حالی که انرژی ذخیره‌شده در اندوکتانس نشی با استفاده از خازن‌های مهارکننده بازیابی می‌شود. اخیراً برخی مبدل‌های ترکیبی با اتصال آنباشی مبدل‌های کلاسیک و مبدل‌های با خازن کلیدزنی، پیشنهاد شده‌اند. این ساختارها می‌توانند به نسبت ولتاژ بالا، بازده تبدیل انرژی بالاتر و استرس ولتاژ کمتر دست یابند [۳۱].

شیمیدان‌ها ارائه شده‌اند. این مدل‌ها می‌توانند عملکرد پیل سوختی را در محدوده وسیعی شبیه‌سازی کنند. با این حال نیاز به دانستن پارامترهایی دارند که به آسانی برای مهندسی برق در دسترس نمی‌باشد. مدل‌های ساده‌تر پیل سوختی نظیر مدل تجربی [۱۲]، از نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آیند. از طرف دیگر، مدل‌های دینامیکی [۱۳]، عملکرد حالت گذرای پیل سوختی را در حین بارگذاری نشان می‌دهند. بسیاری از کارهای تحقیقاتی قبلی، اثر دما را در نظر می‌گیرند و سایر پارامترها را دخیل نمی‌کنند. برای مدل‌سازی برخی از ساختارهای غیرخطی پیل سوختی از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده است [۲]. استفاده از این رویکرد باعث افزایش دقت و تطبیق مدل با شرایط عملکردی می‌شود. علاوه بر این می‌توان رابطه بین جریان و دما را با دقت بیشتری تخمین زد. در [۹]، یک مدل فضای حالت غیرخطی برای پیل سوختی PEM ارائه شده است. یک مدل دینامیکی جدید از پیل سوختی بر اساس مدل تجربی به کمک نرم‌افزار متلب، جهت بررسی مشخصه‌های خروجی آن در [۱۴] توسعه داده شده است. مرجع [۱۵]، به شناسایی پارامترهای مدل مدار الکتریکی پیل سوختی PEM پرداخته است. علاوه بر این، یک مدل گرمایی جدید نیز برای پیل سوختی پیشنهاد کرده است. در [۱۶]، یک مدل ریاضی برای عملکرد یک سلول پیل سوختی PEM که شامل تمامی فرایندهای اساسی الکتروشیمیایی و فیزیکی است، پیشنهاد شده است. همچنین در [۱۷] یک مدل تجربی که قادر است منحنی ولتاژ-جریان پیل سوختی را شبیه‌سازی کند، ارائه شده است. در این مقاله یک مدل دینامیکی و الکتریکی جامع از پیل سوختی ارائه و بررسی می‌شود.

یکی از مشکلات پیل سوختی، ولتاژ متغیر در خروجی به ازای تغییرات جریان اخذ شده از آن است. بنابراین، برای تعیین نقطه کار مشخص باید از مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده کرد. مبدل‌های به کار رفته باید بر اساس مشخصه‌های پیل سوختی طراحی و به کار گرفته شوند. یکی از موارد مهم در رابطه با پیل سوختی، کشیده شدن جریانی صاف از آن است. بنابراین، در طراحی مبدل‌های به کار رفته، باید ریپل جریان در محدوده‌ی مجاز قرار گیرد. از دیگر مشخصه‌های مبدل‌های به کار رفته می‌توان به بهره ولتاژ مبدل اشاره کرد. جهت اتصال پیل سوختی به شبکه و همچنین کاهش ابعاد و هزینه‌ها، مبدل‌هایی با بهره ولتاژ بالا نیاز است [۱۸]. در سامانه‌های پیل سوختی برخی از الزامات که باید در مبدل DC-DC در نظر گرفته شوند، شامل ریپل کم جریان ورودی و خروجی، قابلیت چگالی توان بالا، بازده بالا و پاسخ دینامیکی سریع می‌باشند [۱۹].

اخیراً، تلاش زیادی برای طراحی مبدل‌های DC-DC با ویژگی‌های ذکر شده صورت گرفته است [۲۰]. علی‌رغم این‌که تعداد زیادی مبدل DC-DC از نوع باک-بوست تک کلیده فعال نظیر، سپیک، کاک، باک-بوست متعارف و مبدل‌های فلائی‌بک

<sup>1</sup> InterLeaved

از عملکرد پایدار و حصول کیفیت توان مطلوب، روش‌های کنترلی پیشرفته‌تری باید به کار گرفته شوند [۳۸-۳۹]. اخیراً، روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل (MPC)<sup>۴</sup>، که در آن حالت کلیدزنی بهینه براساس یک تابع هزینه تعیین می‌شود، به‌منظور دستیابی به عملکرد بهتر به کار گرفته شده است. این روش از یک تابع هزینه از پیش تعیین شده، با این هدف که متغیرهای سیستم مقادیر مرجع را دنبال کنند، استفاده می‌کند. یک مدل زمان-گسسته دقیق از سیستم، جهت پیش‌بینی رفتار آینده متغیرها مورد نیاز می‌باشد. در هر پله‌ی زمانی، با توجه به مقادیر پیش‌بینی شده و تابع هزینه، یک مسئله بهینه‌سازی به‌صورت برخط در طول یک افق پیش‌بینی محدود حل می‌شود. این فرایند منجر به استخراج عملگرهای کنترلی مطلوب خواهد شد. در این روش، تعداد زیادی محاسبات باید به‌صورت برخط انجام شود؛ اما به‌کمک ریزپردازنده‌های قدرتمند امروزی، این موضوع نمی‌تواند چالشی برای پیاده‌سازی روش کنترل پیش‌بین در مبدل‌های الکترونیک قدرت که عملکرد دینامیکی سریعی دارند، باشد. در مقایسه با کنترل‌کننده‌های PI، کنترل‌کننده پیش‌بین پاسخ دینامیکی سریع‌تری را فراهم کرده و در طول حالات گذرا نیز بالادگی ایجاد نمی‌شود [۳۴، ۴۰]. در این مقاله در ابتدا به مدل‌سازی جامع دینامیکی و الکتریکی پیل سوختی پرداخته می‌شود. سپس روش کنترل MPC به‌منظور کنترل جریان مبدل DC-DC در سامانه‌های تولید پراکنده ارائه می‌شود. روش کنترل MPC به‌عنوان یک کنترل‌کننده جریان، برای هر دو مبدل افزایش‌دهنده درهم‌تنیده و IBVM به‌منظور تامین پایدار توان DC، هموار کردن خروجی پیل سوختی و ردیابی دقیق جریان مرجع سلف‌های موازی، بدون هیچ‌گونه مدولاسیون اضافی توسعه داده می‌شود. در مقایسه با روش کنترل خطی آشباری مرسوم، روش کنترل MPC پیشنهادی از تنظیم کردن پارامترهای PID، مدولاسیون PWM و تبدیل مختصات پیچیده جلوگیری می‌کند. روش MPC پیشنهادی می‌تواند از طریق تبدیل تنظیم ولتاژ خروجی به تنظیم جریان سلف‌های موازی، توزیع بار یکسان بین شاخه‌های موازی را تضمین کند و بر رفتار غیرحداقلی فاز غلبه کند. در این مقاله، در بخش دوم به مدل‌سازی دینامیکی و الکتریکی پیل سوختی پرداخته می‌شود. در بخش سوم طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین برای مبدل‌های DC-DC درهم‌تنیده و IBVM صورت گرفته و در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود. در نهایت در بخش پنجم، نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

## ۲- مدل‌سازی دینامیکی و الکتریکی پیل سوختی PEM

پیل سوختی PEM از یک غشاء تبادل پروتونی قرار گرفته بین دو الکترود که با کاتالیست پلاتینیوم پوشیده شده است، تشکیل می‌شود. کاتالیست پلاتینیوم به‌منظور افزایش سرعت واکنش شیمیایی در هر دو سمت آند و کاتد استفاده می‌گردد. گاز

در بین مهم‌ترین ساختارهای مبدل DC-DC، مبدل‌های درهم‌تنیده مزیت‌های بسیاری از جمله تقسیم جریان بین شاخه‌ها، استفاده از نیمه‌هادی‌های ارزان‌تر، سلف کوچکتر، کاهش سطح ریبیل جریان، افزایش بازده مبدل و توزیع گرمایی بهتر در طول گرماگیر را دارا می‌باشند [۳۲]. علاوه بر این، استفاده از سلول‌های چندبرابر کننده ولتاژ به‌صورت آشباری با این مبدل، قابلیت دستیابی به بهره‌های ولتاژ بالاتر را در مقایسه با مبدل افزایش‌دهنده کلاسیک به‌همراه دارد [۳۳]. چنین ساختاری، به مبدل IBVM<sup>۱</sup> موسوم است. بنابراین، براساس دلایل فوق‌الذکر، در این مقاله ساختارهای انتخابی جهت اتصال پیل سوختی به باس DC، به ترتیب مبدل افزایش‌دهنده DC-DC درهم‌تنیده و مبدل IBVM می‌باشند. کنترل مبدل‌های DC-DC یکی دیگر از چالش‌هایی هست که اخیراً به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. روش کنترلی باید پاسخ دینامیکی سریعی را فراهم کرده و در عین حال، سیگنال مرجع را به خوبی دنبال کند [۳۴]. طی دهه‌های گذشته، روش‌های متعددی برای مبدل‌های DC-DC نظیر کنترل‌کننده PI، کنترل‌کننده مد لغزشی، کنترل شیفت‌فاز و مدولاسیون پهنای پالس، کنترل هیستریزس جریان، کنترل‌کننده منطق فازی و کنترل تطبیقی استفاده شده است [۳۴-۳۵]. روش کنترل خطی کلاسیک به مدل فضای حالت مبدل متکی است [۳۶]. به‌منظور کاهش این وابستگی، کنترل مد لغزشی در [۳۷] پیشنهاد شده است. اما متأسفانه این روش، حتی در صورت ثابت بودن فرکانس کلیدزنی، فرکانس کلیدزنی اضافی و حالت‌های نوسانی تولید می‌کند.

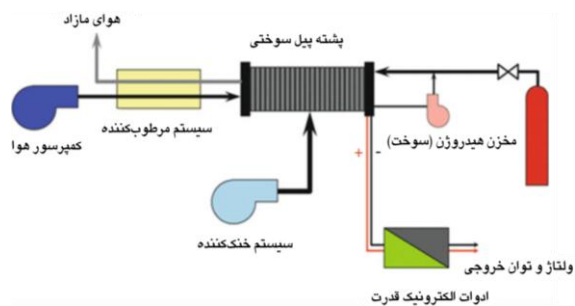
برای چندین دهه، کنترل خطی آشباری<sup>۲</sup> جزو پرکاربردترین روش-روش‌های کنترلی در حوزه مبدل‌های الکترونیک-قدرت بوده است. با این حال، این رویکرد اشکالاتی اساسی دارد. ساختار کنترلی این روش با استفاده از حلقه‌های متعدد فیدبک و مدولاسیون PWM پیچیده است که منجر به پاسخ دینامیکی کند می‌شود. همچنین تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PID<sup>۳</sup>، یک فرایند زمان‌بر بوده و باعث پیچیدگی در پیاده‌سازی می‌شود. علاوه بر این، حل مشکل عدم تعادل جریان سلف نیز دشوار است. اخیراً با توجه به افزایش حضور منابع توان DC در ریزشبکه‌ها نظیر سامانه‌های فتوولتائیک، پیل سوختی، ذخیره‌سازهای انرژی و در نظرگیری سیستم‌های توان AC موجود، ریزشبکه‌های ترکیبی AC/DC به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. در یک ریزشبکه کاربردی، اعوجاجات خروجی منابع تجدیدپذیر می‌تواند منجر به ایجاد نوسانات در ولتاژ باس DC شده و متعاقباً موجب تنزل کیفیت توان در سمت AC گردد. تحت شرایط متغیر تولید توان، روش‌های کنترل آشباری مرسوم همراه با کنترل‌کننده‌های PID ممکن است در مقابله با نوسانات ایجاد شده، دیگر موثر واقع نشده و بر کیفیت ولتاژ تاثیر منفی بگذارد. از این‌رو، برای اطمینان

<sup>1</sup> Interleaved Boost with Voltage Multiplier Converter

<sup>2</sup> Cascade

<sup>3</sup> Proportional Integral Derivative

<sup>4</sup> Model Predictive Control



شکل ۲. شماتیک کلی سامانه پیل سوختی به‌همراه ادوات جانبی آن

در ادامه یک مدل از پیل سوختی که شامل مدل دینامیکی، همراه با مدل مداری پیل سوختی می‌باشد، ارائه می‌گردد. دینامیک سیستم پیل سوختی بر اساس قوانین ترمودینامیک و قانون بقای جرم مدل‌سازی می‌شود. پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی پیل سوختی، در جدول (۱) معرفی شده‌اند.

جدول ۱. پارامترهای مدل‌سازی سامانه پیل سوختی.

|                               |  |                                       |   |
|-------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| $P_{H_2}, P_{H_2O}, P_{O_2}$  | فشار جزئی هیدروژن، آب و اکسیژن (atm)   | $I_{FC}, i_{FC}$                      | جریان (A) و چگالی جریان پیل سوختی ( $A/m^2$ )                         |
| $q_{O_2}^{in}, q_{H_2}^{in}$  | فلوی ورودی اکسیژن و هیدروژن ( $kmol (s)^{-1}$ )                                | $V_{FC}$                              | ولتاژ DC خروجی پیل سوختی (V)  |
| $E_0^{Cell}$                  | ولتاژ مرجع (بی‌باری) در حالت استاندارد یا ولتاژ برگشت‌پذیری حالت استاندارد (V) | $B_{FC}, C_{FC}$                      | ثابت‌هایی به‌منظور شبیه‌سازی اضافه ولتاژ فعال‌سازی ( $A^{-1}$ ) و (V) |
| $E_{cell}^{ocv}$              | ولتاژ استاندارد مدار باز یک سلول (V)   | $E_{FC}$                              | ولتاژ لحظه‌ای نرنست (V)   |
| $N_0$                         | تعداد سلول‌های پیل سوختی   | $V_{an}$                              | حجم آند ( $m^3$ )   |
| $\Delta G, \Delta G^0$        | تغییرات انرژی آزاد گیبس ( $J/mol$ )  | $A_{FC}$                              | مساحت یک سلول ( $m^2$ )   |
| $E_0^A, E_0^C$                | پتانسیل مرجع استاندارد آند و کاتد (V)  | $r_{H-O}$                             | نرخ فلوی هیدروژن-اکسیژن   |
| $k_{H_2}, k_{O_2}, k_{H_2O}$  | ثابت مولی درجه‌ی هیدروژن، اکسیژن و آب ( $kmol(s atm)^{-1}$ )                   | $\tau_{H_2}, \tau_{H_2O}, \tau_{O_2}$ | ثابت زمانی هیدروژن، آب و اکسیژن (s)                                   |
| $\dot{m}_{H_2}$               | نرخ مصرف هیدروژن ( $g/s$ )   | $k_r$                                 | ثابت مدل‌سازی ( $kmol(s A)^{-1}$ )                                    |
| $F$                           | ثابت فارادی ( $C(kmol)^{-1}$ )   | $u_{T_R}$                             | دمای محل (K)  |
| $n_e$                         | تعداد الکترون‌های شرکت‌کننده در واکنش  | $R$                                   | ثابت جهانی گاز ( $J(kmol K)^{-1}$ )                                   |
| $i_{Lm}$                      | جریان محدودکننده ( $A/cm^2$ )  | $k_e$                                 | ثابت تجربی ( $V/K$ )  |
| $V_{cell}$                    | ولتاژ خروجی یک سلول (V)  | $T$                                   | دمای مطلق (K)   |
| $t_m$                         | ضخامت غشا (cm)   | $M_v$                                 | تعداد مول بخار  |
| $C_{fc}$                      | ظرفیت گرمایی ویژه پیل سوختی ( $J/mol K$ )                                      | $M_{fc}$                              | جرم کل پشته پیل سوختی (kg)  |
| $C_{O_2}$                     | غلظت اکسیژن حل‌شده در سطح مایع/گاز ( $mol/cm^3$ )                              | $n_{H_2}$                             | تعداد مول هیدروژن   |
| $V_{act}, V_{ohmic}, V_{con}$ | تلفات ولتاژ فعال‌سازی، اهمی و غلظت (V)   | $R_{act}, R_{ohm}, R_{conc}$          | مقاومت فعال‌سازی، اهمی و غلظت ( $\Omega$ )                            |

هیدروژن در سمت آند و اکسیژن در سمت کاتد تامین شده و ضروری است قبل از اینکه در پیل سوختی تغذیه شوند، مرطوب شوند. در سمت آند، گاز هیدروژن در حضور کاتالیست پلاتینیوم به یون‌های هیدروژن با بار مثبت و الکترون‌هایی با بار منفی، یونیزه می‌شود. واکنش اکسیداسیون در سمت آند به شرح زیر است [۱۴]:

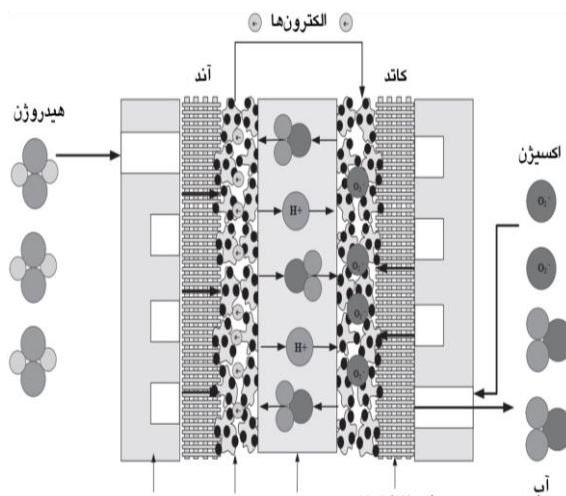


اکسیداسیون در سمت آند همان‌طوری که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، غشاء تبادل پروتون تنها به یون‌های هیدروژن با بار مثبت اجازه عبور از آند به کاتد را داده و الکترون‌های با بار منفی نیز از طریق یک مدار خارجی از آند به سمت کاتد می‌رسند. این فرآیند منجر به تولید جریان الکتریکی می‌شود. در سمت کاتد، الکترون‌ها و پروتون‌ها با اکسیژن هوا ترکیب شده و تولید آب می‌کنند. واکنش شیمیایی کاهش در سمت کاتد

به‌صورت زیر است [۹، ۴۱]:



واکنش کلی ساختار پیل سوختی همراه با نحوه عملکرد آن در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین شماتیک کلی یک سامانه پیل سوختی نیز در شکل (۲) آورده شده است. سامانه پیل سوختی عمدتاً از زیرسامانه‌های تامین هیدروژن، تامین اکسیژن، بازیافت آب و زیرسامانه‌ی خنک‌کننده تشکیل شده است. زیرسامانه تامین هیدروژن از تانک گاز هیدروژن، دریچه کاهش فشار و رطوبت‌ساز تشکیل شده است. زیرسامانه تامین اکسیژن از کمپرسور هوا، خنک‌کننده و رطوبت‌ساز تشکیل شده است. از زیرسامانه‌های خنک‌سازی و مرطوب‌کنندگی به‌ترتیب به‌منظور تنظیم کردن دما و مرطوب‌سازی واکنش استفاده می‌شود [۸].



شکل ۱. ساختار پیل سوختی همراه با نحوه عملکرد آن [۳۸]

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} \cdot (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (۴)$$

فلوی مولی هیدروژن که واکنش می دهد، به صورت زیر بیان می شود:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 \cdot I_{FC}}{2 \cdot F} = 2 \cdot K_r \cdot I_{FC} \quad (۵)$$

$$K_r = \frac{N_0}{4 \cdot F} \quad (۶)$$

با جایگذاری معادله (۵) در معادله (۴)، معادله زیر به دست می آید.

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} \cdot (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - 2 \cdot K_r \cdot I_{FC}) \quad (۷)$$

رابطه تناسبی بین فلوی گاز و فشار جزئی مربوط به آن، در طول یک شیر به صورت زیر بیان می شود

$$\frac{q_{H_2}}{P_{H_2}} = \frac{k_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = k_{H_2} \quad (۸)$$

$$\frac{q_{H_2O}}{P_{H_2O}} = \frac{k_{an}}{\sqrt{M_{H_2O}}} = k_{H_2O} \quad (۹)$$

با جایگذاری معادله (۸) در معادله (۷)، خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} \cdot (q_{H_2}^{in} - k_{H_2} \cdot P_{H_2} - 2 \cdot K_r \cdot I_{FC}) \quad (۱۰)$$

با اعمال تبدیل لاپلاس به دو طرف معادله بالا، داریم:

$$S \cdot P_{H_2}(S) - P_{H_2}(0) = \frac{RT}{V_{an}} \cdot (q_{H_2}^{in}(S) - k_{H_2} \cdot P_{H_2}(S) - 2 \cdot K_r \cdot I_{FC}) \quad (۱۱)$$

در اینجا مقدار اولیه فشار جزئی هیدروژن برابر با صفر می باشد. طبق معادله (۱۱) فشار جزئی گاز هیدروژن به صورت زیر بیان می شود.

$$P_{H_2} = \frac{1/k_{H_2}}{\tau_{H_2} S + 1} (q_{H_2}^{in} - 2 \cdot K_r \cdot I_{FC}) \quad (۱۳)$$

به طور مشابه، فشار جزئی آب و اکسیژن را نیز می توان به دست آورد که به ترتیب به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$P_{O_2} = \frac{1/k_{O_2}}{\tau_{O_2} S + 1} (q_{O_2}^{in} - k_r \cdot I_{FC}) \quad (۱۴)$$

$$P_{H_2O} = \frac{1/k_{H_2O}}{\tau_{H_2O} S + 1} (2 \cdot k_r \cdot I_{FC}) \quad (۱۵)$$

که در معادلات فوق داریم:

| ادامه جدول ۲. پارامترهای مدل سازی سامانه پیل سوختی. |  |                  |  |
|---|--|------------------|--|
| $R_p$   | مقاومت معادل با جابه جایی پروتون ها در غشاء ( $\Omega$ )           | $R_{int}$        | مقاومت داخلی پیل سوختی ( $\Omega$ )            |
| $\rho_M$  | مقاومت ویژه غشاء برای جابه جایی الکترون ها ( $\Omega \text{ cm}$ ) | $R^A, R^C, R_M$  | مقاومت آند، کاتد و غشاء ( $\Omega$ )           |
| $M_{H_2}, M_{H_2O}$                                 | جرم مولی هیدروژن و آب ( $\text{kg (kmol}^{-1}\text{)}$ )           | $\phi_a, \phi_c$ | رطوبت نسبی آند و کاتد                          |
| $h_s$   | ضریب انتقال حرارت همرفتی ( $W / (m^2 K)$ )                         | $(m_s)_M$        | نرخ انتقال بخار ( $\text{mol / s}$ )           |
| $\lambda$   | نسبت مزاد هیدروژن  | $n_d$            | ضریب الکترواستمیک                              |
| $\eta_{act}$  | اضافه ولتاژ فعال سازی ( $V$ )                                      | $U$              | ضریب استفاده                                   |
| $k_{an}$  | ثابت دریچه آند $[\sqrt{\text{kmol Kg (atm s}^{-1}\text{)}}]$       | $\eta_{ohmic}$   | اضافه ولتاژ اهمی ( $V$ )                       |
| $(P_{H_2O})_m^a, (P_{H_2O})_m^c$                    | فشار جزئی آب در سمت آند و کاتد ( $\text{atm}$ )                    | $P_{H_2O}^{Sat}$ | فشار بخار اشباع شده آب ( $\text{atm}$ )        |
| $Q_L$   | تلفات گرمایی ناشی از انتقال هوا ( $J$ )                            | $V_C$            | ولتاژ دو سر خازن لایه دوم                      |
| $Q_E$   | گرمای تولید شده به واسطه جریان الکتریکی ( $J$ )                    | $Q_C$            | تلفات تولید شده به واسطه واکنش شیمیایی ( $J$ ) |

در مدل سازی پیل سوختی فرض می شود که گازهای واکنش دهنده بر اساس قانون گاز ایده آل رفتار کرده و گازها و مایع موجود در سیستم، دارای یک توزیع یکسان می باشند. در ادامه، مراحل مختلف استخراج مدل پیل سوختی، ارائه و تشریح می شوند.

• تعادل جرمی و تعادل انرژی ترمودینامیکی در پیل سوختی

میزان جریان مولی خالص اکسیژن در سمت کاتد، اختلاف بین میزان جریان مولی اکسیژن است که به داخل سلول می آید و میزان جریان مولی که از سلول خارج می شود. با اعمال رابطه گاز ایده آل به هیدروژن، معادله زیر به دست می آید [۴۲-۴۳]:

$$P_{H_2} \cdot V_{an} = n_{H_2} \cdot R \cdot T \quad (۱)$$

با توجه به معادله بالا، فشار گاز هیدروژن به صورت زیر به دست می آید.

$$P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} \cdot n_{H_2} \quad (۲)$$

با مشتق گیری از دو طرف معادله بالا داریم:

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} \cdot \frac{d}{dt} n_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} \cdot q_{H_2} \quad (۳)$$

مشتق  $n_{H_2}$  برابر با  $q_{H_2}$  است که همان فلوی مولی گاز هیدروژن می باشد. سه قسمت مرتبط با فلوی مولی هیدروژن وجود دارد: فلوی ورودی، فلوی شرکت کننده در واکنش و فلوی خروجی. بنابراین:

نرست<sup>۲</sup> نیز شناخته می‌شود را می‌توان از تغییر در انرژی آزاد گیبس به صورت زیر محاسبه کرد [۹، ۱۰].

$$E_{cell}^{ocv} = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (24)$$

تغییر در انرژی آزاد گیبس نیز به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln \left[ \frac{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (25)$$

با جایگذاری معادله (۲۵) در معادله (۲۴) خواهیم داشت:

$$E_{cell}^{ocv} = \left( -\frac{\Delta G^0}{2F} \right) + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (26)$$

$$E_{cell}^{ocv} = E_0^{Cell} + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right]$$

همچنین  $E_0^{Cell}$  را می‌توان با استفاده از جدول پتانسیل الکترود استاندارد سلول الکتروشیمیایی، به صورت زیر به دست آورد.

$$E_0^{Cell} = E_0^A + E_0^C \quad (27)$$

$E_{cell}^{ocv}$  ولتاژ خروجی مدار باز منحصر به فرد یک سلول می‌باشد. در رویکردی دیگر می‌توان آن را با دخیل کردن تغییرات دمایی نسبت به دمای مرجع به صورت زیر نیز محاسبه نمود [۴۴-۴۵].

$$E_{cell}^{ocv} = E_0^{cell} - k_e \cdot (T - T_{ref}) - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{O_2}^{0.5} \cdot P_{H_2}} \right) \quad (28)$$

معمولاً برای مدل ولتاژ خروجی پیل سوختی، ولتاژ مدار باز و سه نوع تلفات اصلی در پیل سوختی شامل تلفات فعال‌سازی، تلفات اهمی و تلفات غلظت باید در نظر گرفته شود. در نتیجه، ولتاژ تامین شده توسط یک سلول پیل سوختی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$V_{cell} = E_{cell}^{ocv} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (29)$$

در رویکردی دیگر منحنی قطبش پیل سوختی را می‌توان از مجموع ولتاژ لحظه‌ای نرست، اضافه ولتاژهای فعال‌سازی و اهمی به دست آورد. با فرض ثابت بودن دما و غلظت اکسیژن، ولتاژ خروجی سلول پیل سوختی، به صورت زیر نیز قابل بیان است [۴۴-۴۵]:

$$V_{FC} = E_{FC} + \eta_{act} + \eta_{ohmic} \quad (30)$$

با توجه به معادله (۳۰) داریم:

$$\eta_{act} = -B_{FC} \ln(C_{FC} I_{FC}) \quad (31)$$

$$\eta_{ohmic} = -R_{FC}^{int} I_{FC} \quad (32)$$

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{k_{H_2} \cdot R \cdot T} \quad (15)$$

$$\tau_{O_2} = \frac{V_{an}}{k_{O_2} \cdot R \cdot T} \quad (16)$$

$$\tau_{H_2O} = \frac{V_{an}}{k_{H_2O} \cdot R \cdot T} \quad (17)$$

همچنین داریم:

$$q_{H_2}^{in} = \frac{N_0 \cdot I_{FC}}{2FU} \quad (18)$$

$$q_{O_2}^{in} = \frac{N_0 \cdot I_{FC}}{2FU} \times \frac{1}{r_{H-O}} \quad (19)$$

### • تغییرات دمایی در پیل سوختی

با توجه به اینکه واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی PEM اتفاق می‌افتد، دمای مونتاژ پیل سوختی افزایش می‌یابد. افزایش خالص در دمای مونتاژ پیل سوختی به صورت رابطه زیر داده می‌شود [۹]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{M_{fc} C_{fc}} \left( \frac{dQ_C}{dt} - \frac{dQ_E}{dt} - \frac{dQ_L}{dt} \right) \quad (20)$$

با توجه به رابطه بالا، تغییرات دمایی در پیل سوختی ناشی از ایجاد سه نوع تلفات می‌باشد: تلفات ناشی از واکنش شیمیایی، تلفات ناشی از توان خروجی الکتریکی و تلفات ناشی از انتقال هوا. تولید گرما در طول واکنش الکتروشیمیایی، تابعی از تغییر در انرژی آزاد گیبس و میزان مصرف جرم مولی هیدروژن است. بنابراین تلفات ناشی از واکنش شیمیایی به صورت زیر مدل می‌شود.

$$\frac{dQ_C}{dt} = \left[ \left( \frac{N_0 \Delta G^0}{2F} \right) - \left( \frac{N_0 RT}{2F} \right) \ln \left( \frac{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \right] I_{FC} \quad (21)$$

تلفات ناشی از توان خروجی الکتریکی، به ولتاژ خروجی و جریان پیل سوختی بستگی دارد. این تلفات به صورت زیر مدل می‌شود.

$$\frac{dQ_E}{dt} = [V_{FC}] I_{FC} \quad (22)$$

تلفات گرما به واسطه انتقال هوا نیز به وسیله رابطه زیر بیان می‌شود.

$$\frac{dQ_L}{dt} = (T - u_{Tr}) h_s N_0 A_{FC} \quad (23)$$

### • ولتاژ مدار باز خروجی پیل سوختی PEM

پتانسیل الکتریکی برگشت‌پذیری<sup>۱</sup> یک سلول که تحت عنوان ولتاژ خروجی مدار باز منحصر به فرد یک سلول و همچنین ولتاژ

<sup>۲</sup> Nernst Voltage

<sup>۱</sup> Reversible

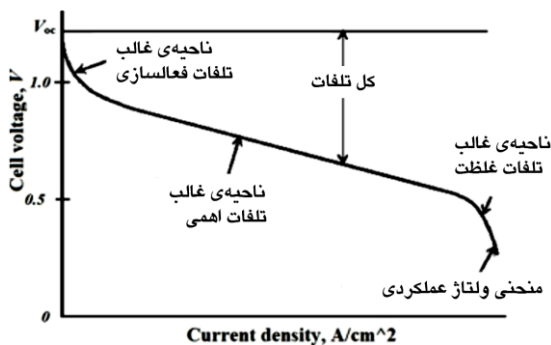
**تلفات اهمی:** تلفات اهمی ناشی از مقاومت اهمی پیل سوختی می‌باشد که شامل مقاومت آند و کاتد، به دلیل نواقص در فرآیند ساخت و مقاومت پیل سوختی ناشی از جابه‌جایی یون‌ها می‌باشد.

مقاومت اهمی پیل سوختی به صورت زیر قابل نوشتن است:

$$R_{ohm} = R^A + R^C + R_M \quad (۳۹)$$

بنابراین، تلفات اهمی ولتاژ برای یک پیل سوختی به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{ohm} = I_{FC} R_{ohm} = V_A^{ohm} + V_C^{ohm} + V_M^{ohm} \quad (۴۰)$$



شکل ۳. منحنی مشخصه V-I پیل سوختی PEM [۴۶].

افت ولتاژ اهمی از مقاومت در برابر انتقال الکترون‌ها از طریق صفحات جمع‌آوری<sup>۱</sup> و الکترودهای کربنی و مقاومت در برابر انتقال پروتون‌ها از طریق غشاء جامد ناشی می‌شود. به طور کلی افت ولتاژ اهمی ناشی از مقاومت غشاء پلیمری در جابه‌جایی الکترون و پروتون می‌باشد. این افت ولتاژ را می‌توان به صورت زیر نیز محاسبه کرد:

$$V_{ohmic} = -I_{FC} (R_M + R_P) \quad (۴۱)$$

مقاومت  $R_P$  بیانگر مقاومت مرتبط با جابه‌جایی پروتون‌ها از طریق غشاء می‌باشد و معمولاً ثابت در نظر گرفته می‌شود. مقاومت  $R_M$  نیز بیانگر مقاومت معادل غشاء است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_M = \frac{\rho_M t_m}{A_{cell}} \quad (۴۲)$$

$\rho_M$  مقاومت ویژه غشاء برای جابه‌جایی الکترون‌ها است که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho_M = \frac{181.6 [1 + 0.03 \cdot (I_{FC} / A_{cell}) + 0.062 \cdot (T / 303)^2 \cdot (I_{FC} / A_{cell})^{2.5}]}{[\lambda_m - 0.634 - 3 \cdot (I_{FC} / A_{cell})] \cdot \exp[4.18 \cdot (T - 303 / T)]} \quad (۴۳)$$

$\lambda_m$  محتوای آب غشاء بوده و تابعی از رطوبت نسبی، نسبت استوکیومتری گاز آند و طول عمر غشاء است.

$$E_{FC} = N_0 \left[ E_0^{Cell} + \frac{RT}{2F} \log \left( \frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \right] \quad (۳۳)$$

بنابراین، ولتاژ خروجی سامانه پیل سوختی را می‌توان با استفاده از روابط زیر مدل‌سازی نمود:

$$V_{FC} = N_0 \left[ E_0^{Cell} + \frac{RT}{2F} \log \left( \frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \right] - B_{FC} \ln(C_{FC} I_{FC}) - R_{FC}^{int} I_{FC} \quad (۳۴)$$

$$V_{FC} = E_{FC} - N_0 [V_{act} + V_{ohmic} + V_{con}] \quad (۳۵)$$

همچنین، بر اساس معادله (۳۶) میزان مصرف سوخت (هیدروژن) مطابق با جریان پیل سوختی است [۱۰].

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{N_0 \cdot M_{H_2}}{n_e \cdot F} \cdot I_{FC} \cdot \lambda \quad (۳۶)$$

**• تلفات ولتاژ برگشت‌ناپذیر در پیل سوختی**

ولتاژ خروجی واقعی پیل سوختی در شرایط عملکرد نرمال، به وسیله تلفات ولتاژ برگشت‌ناپذیر که به عنوان پلاریزاسیون نیز شناخته می‌شود، تعیین می‌گردد. در این راستا، سه نوع تلفات ولتاژ وجود دارد: تلفات فعال‌سازی<sup>۱</sup>، تلفات اهمی<sup>۲</sup> و تلفات غلظت<sup>۳</sup>.

**تلفات فعال‌سازی:** سینتیک آهسته حاکم بر الکترودها همراه با واکنش الکتروشیمیایی در سطح الکترودها باعث به وجود آمدن تلفات فعال‌سازی در پیل سوختی می‌شود. این تلفات در چگالی جریان پایین دارای دامنه بزرگتری است (ابتدای شروع منحنی مشخصه V-I پیل سوختی (شکل ۳)). شکل (۳) میزان تغییرات ولتاژ پیل سوختی را به‌ازای تغییر در چگالی جریان سلول نشان می‌دهد. افت ولتاژ فعال‌سازی را می‌توان به کمک معادله تافل محاسبه نمود که به صورت زیر بیان می‌شود [۹، ۱۴، ۱۵، ۴۴]:

$$V_{act} = - \left[ \zeta_1 + \zeta_2 T + \zeta_3 T \times \ln(C_{O_2}) + \zeta_4 T \times \ln(I_{FC}) \right] \quad (۳۷)$$

در این رابطه،  $\zeta_i$  ضرایب پارامتری برای هر مدل سلول است که به صورت آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. متغیر  $C_{O_2}$  غلظت اکسیژن حل‌شده در سطح گاز/مایع می‌باشد و به صورت زیر قابل حصول می‌باشد.

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{(5.08 \times 10^6) \times \exp(-498 / T)} \quad (۳۸)$$

<sup>1</sup> Activation Losses

<sup>2</sup> Ohmic Losses

<sup>3</sup> Concentration Losses

<sup>4</sup> Collecting Plates



### • تشکیل لایه دوتایی بار الکتریکی<sup>۲</sup> در پیل سوختی PEM

در پیل سوختی PEM با توجه به حضور غشاء پلیمری، الکترون‌ها از آند به سمت کاتد، از طریق مدار خارجی گردش می‌یابند. یون‌های مثبت هیدروژن از طریق غشاء پلیمری به کاتد می‌رسند. در نتیجه دو لایه بار الکتریکی از قطب‌های مخالف در سمت کاتد شکل می‌گیرد. این لایه دوتایی بار الکتریکی می‌تواند بار الکتریکی را ذخیره کند و مشابه یک خازن رفتار نماید. از این رو، ولتاژ ایجاد شده به واسطه این لایه دوتایی بار الکتریکی، برای پاسخ به تغییر ناگهانی جریان، زمان می‌برد. بنابراین، وقتی که جریان به واسطه افزایش ناگهانی بار، افزایش می‌یابد، ولتاژ خروجی به دلیل افت ولتاژ مقاومت  $R_o$ ، یک افت ولتاژ فوری را نشان می‌دهد و پس از آن ولتاژ در یک روند نمایی به دلیل وجود خازن لایه دوتایی بار الکتریکی به مقدار جدید دست می‌یابد. بار الکتریکی ایجاد شده در کاتد را می‌توان با استفاده از یک خازن مدل‌سازی نمود. خازن ناشی از اثر بار الکتریکی لایه دوم، تابعی از مساحت سطح کاتد  $A_s$ ، فاصله بین دو لایه بار الکتریکی  $dl$  و ضریب گذردهی الکتریکی  $\epsilon$  است و به صورت زیر قابل نوشتن است [۴۸، ۱۵، ۱۴]:

$$C = e \left( \frac{A_s}{dl} \right) \quad (50)$$

در ادامه ولتاژ دو سر خازن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_C = \left( I - C \frac{dV_C}{dt} \right) (R_{act} + R_{conc}) \quad (51)$$

### • رطوبت در پیل سوختی PEM

در پیل سوختی PEM، هدایت یون‌های هیدروژن از طریق غشاء پلیمری، به رطوبت غشاء بستگی دارد. مقاومت اهمی غشاء با خشک شدن آن، افزایش می‌یابد. بنابراین، ضروری است که غشاء مرطوب باقی بماند. رطوبت نسبی در آند و کاتد پیل سوختی به ترتیب، به صورت زیر قابل بیان هستند [۹]:

$$\phi_a = \frac{(P_{H_2O})_a^in}{P_{H_2O}^{Sat}} \quad (52)$$

$$\phi_c = \frac{(P_{H_2O})_c^in}{P_{H_2O}^{Sat}} \quad (53)$$

کل بخار انتقال یافته از طریق غشاء پلیمری به صورت زیر می‌باشد.

$$(m_v)_M = M_v A_{FC} N_0 \left( \frac{n_d i_{FC}}{F} - \frac{\phi_c - \phi_a}{t_m} \right) \quad (54)$$

### • مدل مدار الکتریکی سامانه پیل سوختی

ارتباط بین معادلات الکتروشیمیایی پیل سوختی و پارامترهای مدل مداری پیل سوختی در شکل (۴) نشان داده شده است.

**تلفات غلظت:** جابه‌جایی جرمی<sup>۱</sup> بر غلظت هیدروژن و اکسیژن تاثیر می‌گذارد. این موضوع به نوبه خود منجر به کاهش فشار جزئی این گازها می‌شود. کاهش در فشار گازهای هیدروژن و اکسیژن به جریان الکتریکی و مشخصات فیزیکی سیستم بستگی دارد. به طور کلی تلفات غلظت به دلیل تشکیل گرادیان غلظت و اکنشدنده‌ها در سطح الکترودها بوجود می‌آید. مصرف سوخت بیشتر غلظت هیدروژن و اکسیژن را در نقاط مختلف در کانال گاز پیل سوختی کاهش می‌دهد و غلظت این واکنش‌دهنده‌ها را در ورودی پشته پیل سوختی افزایش می‌دهد. مقاومت متناظر با تلفات غلظت ولتاژ را می‌توان با تقسیم معادله (۴۴) بر جریان عبوری به دست آورد. همچنین جریان محدودکننده پیل سوختی به وسیله نسبت مصرف سوخت و نسبت تغذیه سوخت تعیین می‌شود. بنابراین هنگامی که سوخت با سرعت و نسبت بیشتری مصرف شود، تلفات غلظت در جریان‌های بالاتر، به طور قابل توجهی رشد می‌کند (در انتهای منحنی مشخصه V-I پیل سوختی). در نهایت، اضافه ولتاژ غلظت در پیل سوختی به صورت زیر تعیین می‌شود [۴۴، ۹]:

$$V_{con} = \frac{RT}{n_e F} \ln \left( 1 - \frac{I_{FC}}{i_{Lm} A_{cell}} \right) \quad (44)$$

همچنین با توجه به مرجع [۴۷]، می‌توان ولتاژهای فعال‌سازی و غلظت برای پیل سوختی را به صورت زیر نیز محاسبه نمود:

$$V_{act} = V_0 + V_a (1 - e^{-C_1 i_{FC}}) \quad (45)$$

$$V_{conc} = i_{FC} \left( C_2 \frac{i_{FC}}{i_{max}} \right)^{C_3} \quad (46)$$

$$i_{FC} = \frac{i_{st}}{A_{FC}} \quad (47)$$

$V_0$  افت ولتاژ در چگالی جریان صفر بوده و  $R_{ohm}$  مقاومت داخلی الکتریکی وابسته به دما و رطوبت غشاء می‌باشد. همچنین،  $i_{max}$  چگالی جریان متناظر با افت ولتاژ غلظت بوده و  $V_a$  و  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $C_3$  ثابت‌هایی هستند که می‌توان آن‌ها را با استفاده از رگرسیون غیر-خطی به وسیله داده‌های پلاریزاسیون از پیل سوختی تعیین نمود. با تقسیم ولتاژهای به دست آمده بر جریان عبوری از پیل سوختی، مقاومت‌های غلظت و فعال‌سازی به صورت زیر تعیین می‌شوند.

$$R_{act} = \frac{1}{i_{FC}} \left[ V_0 + V_a (1 - e^{-C_1 i_{FC}}) \right] \quad (48)$$

$$R_{conc} = \left( C_2 \frac{i_{FC}}{i_{max}} \right)^{C_3} \quad (49)$$

بنابراین ولتاژ خروجی واقعی پیل سوختی در شرایط عملکردی نرمال، با تفریق تلفات ولتاژ از ولتاژ خروجی مدار باز به دست می‌آید.

<sup>۲</sup> Charge Double Layer

<sup>۱</sup> Mass Transport

• بازده سامانه‌ی پیل سوختی

بازده تئوری سامانه پیل سوختی، به صورت نسبت بین انرژی مفید تولیدشده و انرژی ورودی تعریف می‌شود. بازده تئوری سامانه پیل سوختی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [۴۹]:

$$\eta_{FC} = \frac{\Delta G}{\Delta G_{FC}} \quad (۵۸)$$

در اینجا  $\Delta G$  آنتالپی گاز هیدروژن و  $\Delta G_{FC}$  انرژی الکتریکی تولید شده می‌باشد. بازده سامانه پیل سوختی، مبتنی بر محاسبه آنتالپی است که می‌تواند در عمل پیچیده باشد. بدین ترتیب، یک رویکرد ساده که در آن بازده پیل سوختی تنها براساس اندازه‌گیری ولتاژ و تخمین نرخ سوخت تخمین زده می‌شود، به کار گرفته می‌شود. بازده سامانه پیل سوختی به بازده ولتاژ نیز موسوم است و به صورت زیر بیان می‌شود:

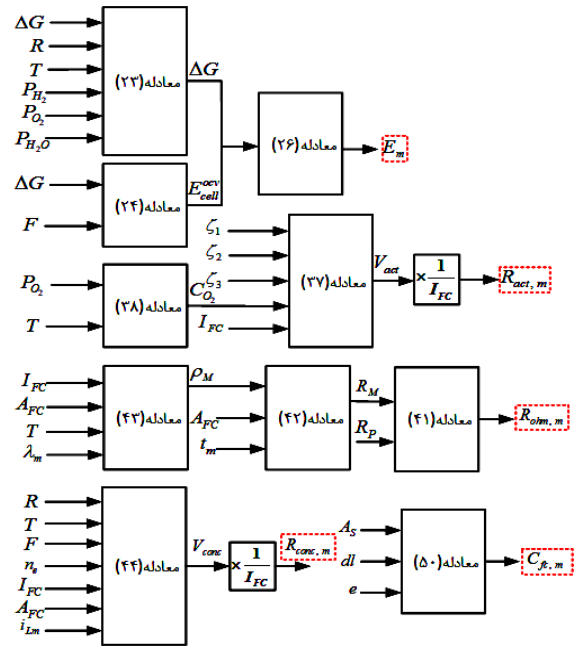
$$\eta_{FC-v} = \mu_F \frac{V_{FC}}{E_{th}} \quad (۵۹)$$

در اینجا  $\mu_F$  نرخ مصرف سوخت است که معمولاً به مقدار ۰/۹۵ نزدیک می‌باشد.  $E_{th}$  پتانسیل گرمایشی است و مقدار آن به مقدار گرمای هیدروژن بستگی دارد. بازده انرژی سامانه پیل سوختی که متناسب با ولتاژ آن است را می‌توان به صورت زیر نیز بیان نمود.

$$\eta_{FC} = \frac{V_{FC}}{1.482 \cdot N_0} \quad (۶۰)$$

۳- مبدل DC-DC متصل به پیل سوختی

منابع انرژی تجدیدپذیر جریان بالا و ولتاژ پایین، جهت اتصال به شبکه به مبدل‌های قدرت نیاز دارند. این مبدل‌ها برای تنظیم ولتاژ لینک DC و یا جریان کشیده‌شده از منبع DC، مورد استفاده قرار می‌گیرند. پیل سوختی یک منبع انرژی با مشخصات بالا است و در بیشتر کاربردها در توان کم و متوسط کار می‌کند. مبدل‌های افزایشنده DC-DC جهت تطابق ولتاژ ترمینال پیل سوختی با ولتاژ شبکه استفاده می‌شوند. در این راستا، ساختار مبدل و روش کنترل آن نقشی مهم از نظر پایداری، قابلیت بلاک کردن نوسانات سمت AC و پردازش توان ایفا می‌کند [۵۰]. مبدل افزایشنده DC-DC از نوع درهم‌تنیده از دو شاخه موازی تشکیل شده است. از مهم‌ترین مزایای حاصل از موازی کردن مبدل‌ها می‌توان به کاهش هزینه و قابلیت اطمینان بالاتر اشاره کرد. از آنجا که جریان بار بین شاخه‌های منحصربه‌فرد مبدل به‌طور یکسان توزیع می‌شود، اجزائی که استفاده می‌شوند، ارزان‌تر هستند. همچنین خرابی یک شاخه موازی، عملکرد کل مبدل را مختل نمی‌کند که این امر منجر به افزایش تحمل خطا در این ساختار می‌شود. با این حال در



شکل ۴. ارتباط بین معادلات الکتروشیمیایی پیل سوختی و مدل مداری.

براساس شکل (۴)، مدار معادل الکتریکی پیل سوختی به صورت شکل (۵) به دست می‌آید. به‌طور کلی رفتار الکتریکی مدل سلول پیل سوختی را می‌توان مطابق با شکل (۵) به صورت زیر توصیف کرد.

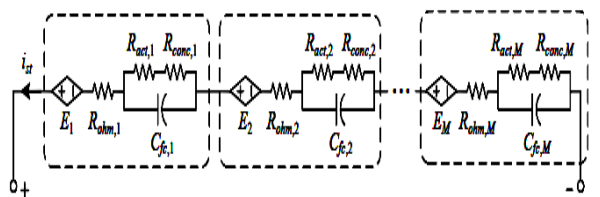
$$C_{fc,m} \frac{dV_{fc,m}}{dt} + \frac{V_{fc,m} - V_{fc,m\_init}}{R_{act,m} + R_{conc,m}} = i_{st} \quad (۵۵)$$

$$V_{cell,m} = E_m - V_{fc,m} - i_{st} R_{ohm,m} \quad (۵۶)$$

در اینجا  $m$  تعداد سلول پشت‌پیل سوختی بوده و  $R_{act,m}$  و  $R_{conc,m}$  معرف مقاومت‌های فعال‌سازی و غلظت می‌باشند. همچنین  $V_{fc,m}$  و  $C_{fc,m}$  به ترتیب بیانگر خازن معادل و ولتاژ آن بوده و  $V_{fc,m\_init}$  نیز ولتاژ اولیه خازن معادل را نشان می‌دهد. به‌علاوه،  $V_{cell,m}$  معرف ولتاژ ترمینال پیل سوختی بوده و  $E_m$  ولتاژ مدار باز پیل سوختی را بیان می‌کند.  $R_{ohm,m}$  نیز نشان‌دهنده مقاومت اهمی می‌باشد. بنابراین، ولتاژ پشت‌پیل سوختی را می‌توان به صورت زیر توصیف نمود:

$$V_{stack} = \sum_{m=1}^M V_{cell,m} = \sum_{m=1}^M (E_m - V_{fc,m} - i_{st} R_{ohm,m}) \quad (۵۷)$$

در اینجا  $V_{stack}$  بیانگر ولتاژ پشت‌پیل سوختی است [۴۷، ۱۵].



شکل ۵. مدار معادل الکتریکی پیل سوختی

زمان-پیوسته به‌دست آمده و تقریب پیش‌روی مشتق اولی، مدل زمان-گسسته مبدل به‌دست می‌آید. فرمول تقریب پیش‌روی مشتق اولی به‌صورت زیر می‌باشد. در این تقریب، دوره زمانی نمونه‌برداری است [۵۲].

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X(k+1) - X(k)}{T_s} \quad (۶۴)$$

مدل زمان-گسسته با تغییر حالت کلیدزنی، تغییر می‌کند. در حالت افزایشی، مدل‌های معادل مبدل براساس چهار نوع حالت کلیدزنی که در ادامه بیان می‌شوند، به‌دست می‌آیند. حالت‌های مختلف کلیدزنی مبدل و مدل زمان-گسسته هر حالت به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

• **حالت اول: ( $S_1=1, S_2=1$ )**

با توجه به معادلات (۶۱ و ۶۲)، مدل زمان-پیوسته معادل را می‌توان به کمک معادله زیر توصیف کرد:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in} - r_1 i_{L1} \quad (۶۵)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{in} - r_2 i_{L2}$$

مدل زمان-گسسته (مدل پیش‌بین) مبدل نیز به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$i_{L1}(k+1) = \frac{T_s}{L_1} (V_{in}(k) - r_1 i_{L1}(k)) + i_{L1}(k) \quad (۶۶)$$

$$i_{L2}(k+1) = \frac{T_s}{L_2} (V_{in}(k) - r_2 i_{L2}(k)) + i_{L2}(k)$$

به‌طور مشابه، مدل‌های زمان-گسسته متناظر با سه حالت کلیدزنی دیگر به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

• **حالت دوم: ( $S_1=0, S_2=1$ )**

$$i_{L1}(k+1) = \frac{T_s}{L_1} (V_{in}(k) - V_o(k) - r_1 i_{L1}(k)) + i_{L1}(k) \quad (۶۷)$$

$$i_{L2}(k+1) = \frac{T_s}{L_2} (V_{in}(k) - r_2 i_{L2}(k)) + i_{L2}(k)$$

• **حالت سوم: ( $S_1=1, S_2=0$ )**

$$i_{L1}(k+1) = \frac{T_s}{L_1} (V_{in}(k) - r_1 i_{L1}(k)) + i_{L1}(k) \quad (۶۸)$$

$$i_{L2}(k+1) = \frac{T_s}{L_2} (V_{in}(k) - V_o(k) - r_2 i_{L2}(k)) + i_{L2}(k)$$

• **حالت چهارم: ( $S_1=0, S_2=0$ )**

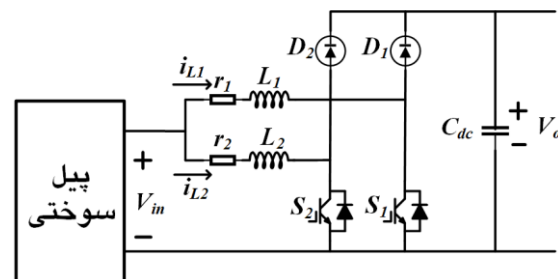
$$i_{L1}(k+1) = \frac{T_s}{L_1} (V_{in}(k) - V_o(k) - r_1 i_{L1}(k)) + i_{L1}(k) \quad (۶۹)$$

$$i_{L2}(k+1) = \frac{T_s}{L_2} (V_{in}(k) - V_o(k) - r_2 i_{L2}(k)) + i_{L2}(k)$$

واقعیت با توجه به دلایلی نظیر عدم تطابق اجزاء، شامل اندوکتانس و نیمه‌هادی‌های قدرت، و نیز تغییرات پارامترها ناشی از افزایش دما، شاخه‌های موازی نمی‌توانند کاملاً یکسان باشند. بنابراین کلیدهای قدرت باید به‌گونه‌ای روشن و خاموش شوند که جریان بار به‌صورت یکسان بین شاخه‌ها تقسیم گردد [۵۱].

### ۳-۱- کنترل پیش‌بین مبدل افزایشی DC-DC درهم‌تنیده

ساختار مبدل افزایشی DC-DC درهم‌تنیده در شکل (۶) نشان داده شده است. مبدل افزایشی DC-DC درهم‌تنیده، دو مبدل افزایشی یکسان دارد که به‌صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. هر شاخه، از یک سلف  $L_i$  ( $i=1, 2$ )، مقاومت‌های سری معادل  $r_i$  ( $i=1, 2$ )، کلید قدرت  $S_i$  ( $i=1, 2$ ) و یک دیود  $D_i$  ( $i=1, 2$ ) تشکیل شده است. در این مبدل، بسته به نوع حالت کلیدزنی، حالت‌های مختلف عملکردی وجود دارد. وقتی که کلید  $S_i$  روشن باشد، جریان سلف  $i_{Li}$  افزایش می‌یابد و انرژی در آن ذخیره می‌شود. وقتی که کلید  $S_i$  خاموش باشد، جریان سلف  $i_{Li}$  کاهش یافته و انرژی آن آزاد می‌شود. در این شرایط دیود  $D_i$  هدایت می‌کند.



شکل ۶. ساختار مبدل افزایشی DC-DC درهم‌تنیده

جریان سلف‌ها ( $i_{L1}, i_{L2}$ ) و ولتاژ خروجی  $V_o$  به‌عنوان متغیرهای حالت در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به قانون ولتاژ و جریان کیرشهف، مدل حالت زمان-پیوسته را می‌توان بر اساس شکل (۶) به‌صورت زیر بیان نمود [۳۱]:

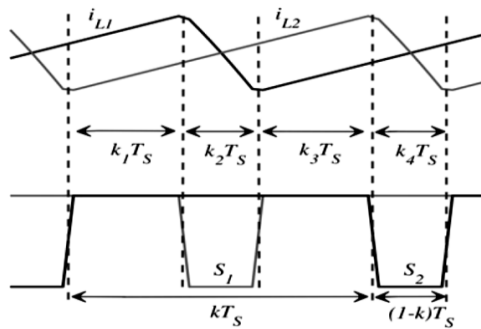
$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in} - (1-u_1)V_o - r_1 i_{L1} \quad (۶۱)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{in} - (1-u_2)V_o - r_2 i_{L2} \quad (۶۲)$$

$$C \frac{dV_o}{dt} = (1-u_1)i_{L1} + (1-u_2)i_{L2} - \frac{V_o}{R_L} \quad (۶۳)$$

در اینجا  $u_i$  ( $i=1, 2$ ) بیانگر حالت کلیدزنی کلیدهای  $S_i$  و  $S_2$  است.  $u_i = 1$  به این معناست که کلید  $S_i$  روشن بوده و  $u_i = 0$  نیز معنای خاموش بودن کلید  $S_i$  می‌باشد.

به‌منظور طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین، یک مدل ریاضی زمان-گسسته، برای پیش‌بینی مقادیر آینده سیستم نظیر جریان‌ها و ولتاژها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با کمک معادلات



شکل ۸. بازه‌های مختلف کلیدزنی مبدل IBVM [۵۳].

➤ **حالت کلیدزنی اول (S<sub>1</sub>=1, S<sub>2</sub>=1)**

در طول بازه اول کلیدزنی (k<sub>1</sub>T<sub>s</sub>)، کلیدهای S<sub>1</sub> و S<sub>2</sub> روشن بوده و دیودهای D<sub>1</sub>، D<sub>2</sub>، D<sub>3</sub> و D<sub>4</sub> بایاس معکوس هستند. همچنین از تلفات خازن صرف‌نظر می‌شود. معادلات ریاضی توصیف‌کننده این حالت کلیدزنی به شرح زیر می‌باشند:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in} - R_1 i_{L1} \quad (71)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{in} - R_2 i_{L2} \quad (72)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_C}{R_L} - i_o \quad (73)$$

➤ **حالت کلیدزنی دوم (S<sub>1</sub>=0, S<sub>2</sub>=1)**

در طول بازه دوم کلیدزنی (k<sub>2</sub>T<sub>s</sub>)، کلید S<sub>1</sub> خاموش می‌شود و کلید S<sub>2</sub> روشن می‌ماند و دیودهای D<sub>2</sub> و D<sub>4</sub> نیز هدایت می‌کنند. معادلات ریاضی حاکم بر این حالت کلیدزنی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in} - R_1 i_{L1} \quad (74)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{in} - R_2 i_{L2} - V_{C1} \quad (75)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{in} - R_2 i_{L2} + V_{C2} - V_C \quad (76)$$

$$V_C = V_{C1} + V_{C2} \quad (77)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_C}{R_L} + i_{L2} \quad (78)$$

➤ **حالت کلیدزنی سوم (S<sub>1</sub>=1, S<sub>2</sub>=1)**

از لحاظ رفتار دینامیکی، بازه سوم (k<sub>3</sub>T<sub>s</sub>) معادل با بازه اول است.

➤ **حالت کلیدزنی چهارم (S<sub>1</sub>=1, S<sub>2</sub>=0)**

بازه آخر (k<sub>4</sub>T<sub>s</sub>) از لحاظ رفتار دینامیکی مشابه با بازه دوم است اما حالت کلیدزنی مربوط به آن، متفاوت است. در این حالت، کلید S<sub>1</sub> روشن می‌ماند و کلید S<sub>2</sub> خاموش است. همچنین دیودهای D<sub>1</sub> و D<sub>3</sub> هدایت می‌کنند. معادلات حاکم بر این حالت کلیدزنی به شرح زیر بیان می‌شوند:

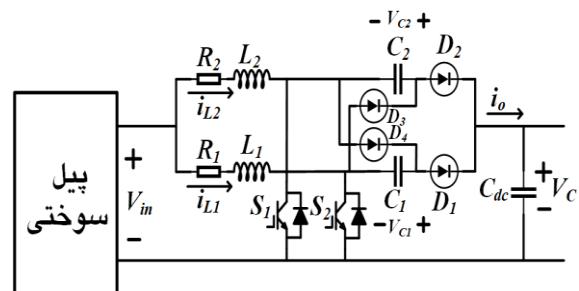
در این روش، هدف کنترل‌کننده پیش‌بین، کنترل جریان مبدل و تقسیم مساوی جریان بین شاخه‌های موازی مبدل است، بنابراین، تابع هزینه متناظر به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$J = \lambda_1 \left( i_{L1}^p(k+1) - \frac{I_{ref}}{2} \right)^2 + \lambda_2 \left( i_{L2}^p(k+1) - \frac{I_{ref}}{2} \right)^2 \quad (70)$$

λ<sub>1</sub> و λ<sub>2</sub> ضرایب وزنی هستند. از آنجایی که میزان اهمیت جریان هر دو سلف موازی یکسان می‌باشد و هدف اصلی کنترل‌کننده تقسیم مساوی جریان بین شاخه‌های موازی مبدل است، λ<sub>1</sub> = λ<sub>2</sub> = 1 در نظر گرفته می‌شود. اگر J<sub>1</sub>، J<sub>2</sub>، J<sub>3</sub>، J<sub>4</sub> به ترتیب توابع هدف متناظر با چهار نوع حالت کلیدزنی باشند، حالت کلیدزنی متناظر با min(J<sub>1</sub>، J<sub>2</sub>، J<sub>3</sub>، J<sub>4</sub>) انتخاب می‌شود و در دوره نمونه‌برداری بعدی به منظور دستیابی به عملکرد بهینه اعمال می‌شود.

**۳-۲- کنترل پیش‌بین مبدل IBVM**

ساختار مبدل IBVM دو فاز همراه با چند برابر کننده ولتاژ در شکل (۷) نشان داده شده است. بهره‌ی ولتاژ این مبدل دو برابر مبدل افزایشنده است، در حالیکه استرس ولتاژ روی کلیدها در مقایسه با مبدل افزایشنده نصف شده است. علاوه بر این، ریپل جریان ورودی و ولتاژ خروجی نیز کاهش می‌یابند. این مبدل، یک مبدل افزایشنده همراه با تقسیم‌کننده جریان بین فازها و سلول دو برابر کننده ولتاژ می‌باشد. به منظور طراحی کنترل‌کننده و ارزیابی آن، پارامترهای مبدل به صورت سلف‌های L<sub>1</sub> و L<sub>2</sub> و تلفات آن‌ها (R<sub>1</sub>، R<sub>2</sub>)، خازن‌های C<sub>1</sub> و C<sub>2</sub>، و ترانزیستورهای S<sub>1</sub> و S<sub>2</sub> می‌باشند.



شکل ۷. ساختار کلی مبدل IBVM.

مبدل IBVM در حالت هدایت پیوسته با چهار بازه متفاوت کلیدزنی کار می‌کند. حالت‌های مختلف کلیدزنی مبدل IBVM در شکل (۸) نشان داده شده است. چهار حالت کلیدزنی وجود دارد که دو حالت کلیدزنی (حالت‌های اول و سوم) مشابه هم هستند [۵۳]. در ادامه به منظور طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین، مدل معادل مبدل به ازای هر حالت کلیدزنی ارائه می‌شود.

$\lambda_1$  و  $\lambda_2$  ضرایب وزنی هستند. از آنجایی که میزان اهمیت جریان هر دو سلف موازی یکسان می‌باشد و هدف اصلی کنترل‌کننده تقسیم مساوی جریان بین شاخه‌های موازی مبدل است،  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$  در نظر گرفته می‌شود. در اینجا  $I_{ref}$  جریان مرجع پیل سوختی می‌باشد که یک سیگنال خارجی بوده و مقدار آن بر مبنای عملکرد سیستم مدیریت انرژی تنظیم می‌شود. مقدار تابع هزینه به ازای هر چهار حالت کلیدزنی محاسبه شده و سپس کمترین مقدار که بیانگر حالت کلیدزنی بهینه می‌باشد، در دوره عملکرد بعدی اعمال می‌شود.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور استخراج منحنی مشخصه‌های پیل سوختی و بخصوص منحنی ولتاژ-جریان آن، مدل دینامیکی به دست آمده برای پیل سوختی در محیط Matlab/Simulink شبیه‌سازی می‌شود. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای مدل‌سازی پیل سوختی (6 PEM kW) در جدول (۱) ارائه شده است. شکل (۹) منحنی ولتاژ-جریان پیل سوختی را نشان می‌دهد. شکل (۱۰) منحنی توان برحسب جریان عبوری از پیل سوختی را نشان می‌دهد. منحنی‌های بازده برحسب توان و جریان به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ترسیم شده است. براساس منحنی بازده پیل سوختی برحسب توان خروجی پیل سوختی، بازده بیشینه در محدوده ۶۰ درصد قرار دارد و پیل سوختی می‌تواند در طول محدوده گسترده‌ای از توان خروجی با بازده‌ای در حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد، عملکرد داشته باشد. شکل (۱۳) فشار جزئی گاز هیدروژن برحسب جریان عبوری از پیل سوختی را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش جریان عبوری از پیل سوختی، فشار گاز هیدروژن نیز افزایش می‌یابد. در این مدل، فشار گازهای هیدروژن و اکسیژن برحسب جریان عبوری از پیل سوختی تنظیم می‌شوند. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب منحنی‌های فشار جزئی اکسیژن و آب را برحسب جریان عبوری از آن نشان می‌دهند. در ادامه به منظور صحت‌سنجی عملکرد روش کنترل ارائه شده برای مبدل افزایش‌دهنده DC-DC در هم‌تنیده و مبدل IBVM، سیستم پیشنهادی در محیط Matlab/Simulink پیاده‌سازی و نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود. جدول (۲) مقادیر پارامترهای اصلی هر دو مبدل را نشان می‌دهد. یک پیل سوختی PEM با توان ۶ kW و ولتاژ ۴۵ V به هر دو مبدل متصل شده است. شکل (۱۶) جریان مرجع برای هر دو مبدل را نشان می‌دهد. این جریان در واقع جریان مرجع هر کدام از سلف‌های موازی می‌باشد که به عنوان یک سیگنال خارجی به کنترل‌کننده پیش‌بین اعمال می‌شود. جریان مرجع به منظور

$$L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} = V_{in} - R_1 i_{L_1} - V_{C_2} \quad (79)$$

$$L_1 \frac{di_{L_2}}{dt} = V_{in} - R_2 i_{L_2} + V_{C_1} - V_C \quad (80)$$

$$L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} = V_{in} - R_2 i_{L_2} \quad (81)$$

$$V_C = V_{C_1} + V_{C_2} \quad (82)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_C}{R_L} + i_{L_1} \quad (83)$$

به منظور پیش‌بینی مقادیر آینده در دوره زمانی  $(k+1)$  ام، با استفاده از جریان‌ها و ولتاژهای اندازه‌گیری شده در دوره زمانی  $k$  ام، مدل زمان-گسسته مبدل مورد نیاز می‌باشد. بنابراین با استفاده از تقریب پیش‌روی اویلر، مدل زمان-گسسته مبدل به طور مشابه با قسمت قبل به دست می‌آید. در این روش، هدف اصلی کنترل جریانی مبدل و تقسیم مساوی جریان بین سلف‌های ورودی مبدل می‌باشد. در واقع جریان سلف‌های ورودی باید کنترل شوند. بنابراین، معادلات به دست آمده برای جریان سلف‌ها در هر کدام از حالت‌های کلیدزنی، باید به صورت گسسته بیان شوند. معادلات زمان-گسسته جریان سلف‌ها به صورت زیر به دست می‌آیند.

#### ➤ حالت کلیدزنی اول ( $S_1=1, S_2=1$ )

$$i_{L_1}(k+1) = \frac{T_s}{L_1} (V_{in}(k) - R_1 i_{L_1}(k)) + i_{L_1}(k) \quad (84)$$

$$i_{L_2}(k+1) = \frac{T_s}{L_2} (V_{in}(k) - R_2 i_{L_2}(k)) + i_{L_2}(k)$$

#### ➤ حالت کلیدزنی دوم ( $S_1=0, S_2=1$ )

$$i_{L_1}(k+1) = \frac{T_s}{L_1} (V_{in}(k) - R_1 i_{L_1}(k)) + i_{L_1}(k) \quad (85)$$

$$i_{L_2}(k+1) = \frac{T_s}{L_2} (V_{in}(k) - R_2 i_{L_2}(k) + V_{C_2}(k) - V_C(k)) + i_{L_2}(k)$$

#### ➤ حالت کلیدزنی چهارم ( $S_1=1, S_2=0$ )

$$i_{L_1}(k+1) = \frac{T_s}{L_1} (V_{in}(k) - R_1 i_{L_1}(k) + V_{C_1}(k) - V_C(k)) + i_{L_1}(k) \quad (86)$$

$$i_{L_2}(k+1) = \frac{T_s}{L_2} (V_{in}(k) - R_2 i_{L_2}(k)) + i_{L_2}(k)$$

از آنجا که در این روش هدف کنترل‌کننده پیش‌بین، کنترل جریانی مبدل IBVM و تقسیم مساوی جریان بین شاخه‌های موازی مبدل است، بنابراین، تابع هزینه مطلوب به صورت زیر تعریف می‌شود.

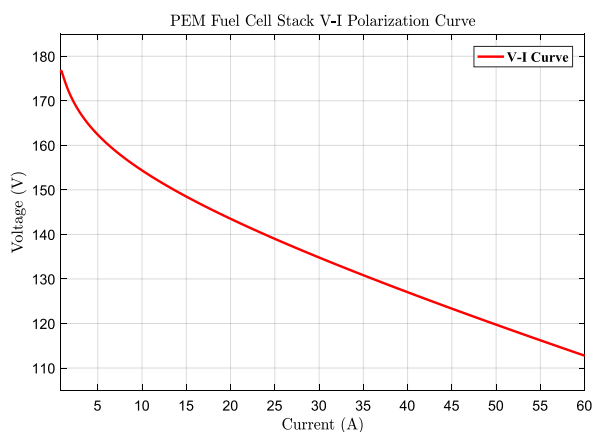
$$J = \lambda_1 \left( i_{L_1}(k+1) - \frac{I_{ref}}{2} \right)^2 + \lambda_2 \left( i_{L_2}(k+1) - \frac{I_{ref}}{2} \right)^2 \quad (87)$$

جدول ۱. مقادیر پارامترهای استفاده‌شده برای مدل‌سازی پیل سوختی.

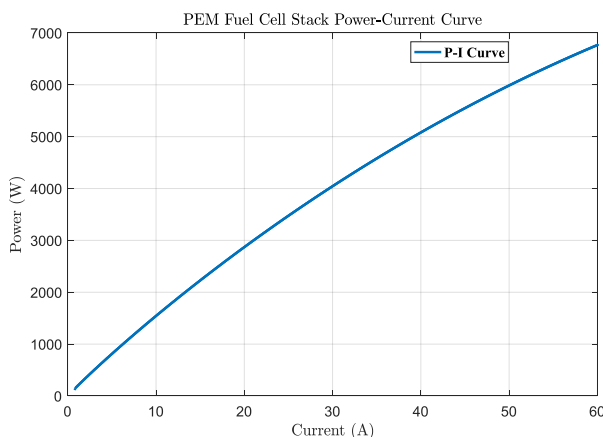
|               |                               |              |                       |
|---------------|-------------------------------|--------------|-----------------------|
| $B_{FC}$      | ۰/۰۴۷۷۷                       | $F$          | ۹۶۴۸۴۶۰۰              |
| $\tau_{H_2O}$ | ۱۸/۴۱۸                        | $k_{H_2}$    | $۴/۲۲ \times 10^{-۵}$ |
| $k_{H_2O}$    | $۷/۷۱۶ \times 10^{-۶}$        | $r_{H-O}$    | ۱/۱۶۸                 |
| $N_0$         | ۱۸۰                           | $U$          | ۰/۸                   |
| $V_{an}$      | ۱۵۰                           | $\zeta_2$    | ۰/۰۰۳۵۴               |
| $\zeta_4$     | $۱/۹۳ \times 10^{-۴}$         | $t_m$        | $۱۷۸ \times 10^{-۴}$  |
| $C_{FC}$      | ۰/۰۱۳۶                        | $\tau_{H_2}$ | ۳/۳۷                  |
| $\tau_{O_2}$  | ۶/۷۴                          | $k_{O_2}$    | $۲/۱ \times 10^{-۵}$  |
| $k_r$         | $۲/۲۸ \cdot ۲ \times 10^{-۵}$ | $R_{int}$    | ۰/۰۰۳۰۳               |
| $R$           | ۸۳۱۴/۴۷                       | $i_{Lm}$     | ۱/۵                   |
| $\zeta_1$     | -۰/۹۴۸                        | $\zeta_3$    | $۷/۶ \times 10^{-۵}$  |
| $A_{FC}$      | ۵۰/۶                          | $\lambda$    | ۲۳                    |

جدول ۲. مقادیر پارامترهای اصلی هر دو مبدل.

|           |              |          |         |       |             |
|-----------|--------------|----------|---------|-------|-------------|
| $r_{L_1}$ | ۰/۳ $\Omega$ | $L_1$    | ۵ mH    | $C_1$ | ۱۵۰ $\mu F$ |
| $r_{L_2}$ | ۰/۳ $\Omega$ | $L_2$    | ۵ mH    | $C_2$ | ۱۵۰ $\mu F$ |
| $f_s$     | ۲۰ kHz       | $V_{in}$ | ۳۷-۶۵ V | $C$   | ۶۸۰ $\mu F$ |

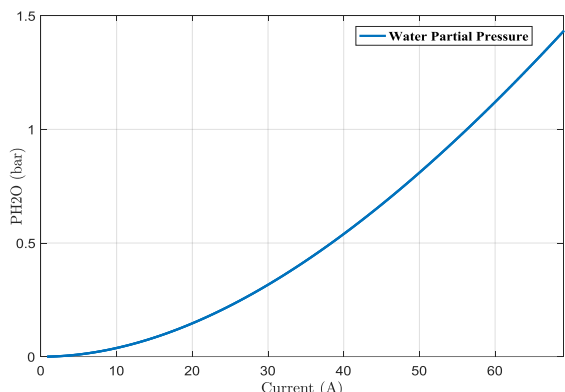


شکل ۹. منحنی ولتاژ- جریان پیل سوختی PEM.

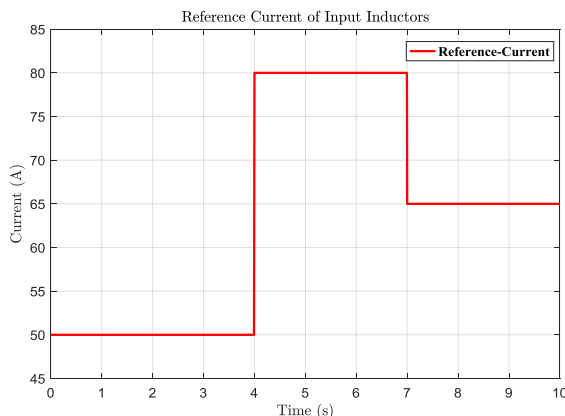


شکل ۱۰. منحنی توان برحسب جریان پیل سوختی PEM.

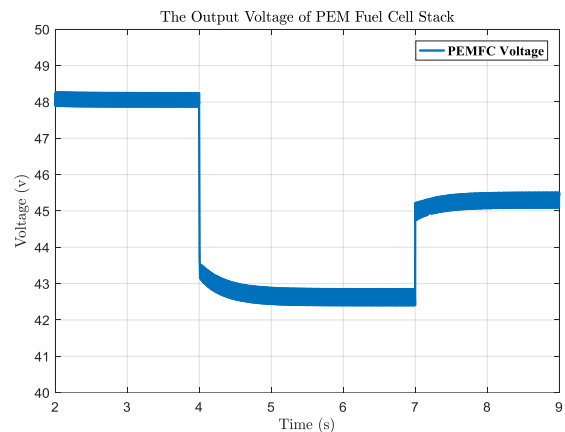
نشان دادن دقت کنترل‌کننده پیش‌بین و تغییرات بار متصل، به‌صورت یک سیگنال پله‌ای در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به‌ترتیب ولتاژ خروجی و جریان اخذ شده از پیل سوختی را در مبدل افزایش‌دهنده درهم‌تنیده نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، با تغییر در جریان مرجع، جریان تزریقی توسط پیل سوختی و متعاقباً ولتاژ خروجی پیل سوختی تغییر می‌کند. با توجه به دینامیک کند پیل سوختی، ولتاژ خروجی آن به‌طور آنی تغییر نمی‌کند و همواره با یک تاخیر و حالت دینامیکی به مقدار حالت ماندگار خود می‌رسد. این موضوع ناشی از دینامیک کند پیل سوختی می‌باشد که در فرایند شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است و در شکل (۱۷) نیز قابل مشاهده می‌باشد. شکل (۱۹) جریان هرکدام از سلف‌های موازی را همراه با جریان مرجع نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که جریان مرجع به خوبی دنبال شده و ریپل جریان نیز بسیار کم است. شکل (۲۰) ولتاژ لینک DC را به‌ازای جریان مرجع ورودی نشان می‌دهد. خازن لینک DC جهت تثبیت ولتاژ لینک DC در انتهای مبدل قرار داده شده است. از آنجایی که توان اکتیو مرجع (جریان مرجع) به‌صورت پله‌ای در نظر گرفته شده است، بنابراین، همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمان‌هایی که مقدار این جریان افزایش و کاهش پیدا می‌کند، جریان ورودی و یا خروجی به خازن نیز تغییر می‌کند که به‌طور متناظر ولتاژ آن افزایش و یا کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه در ولتاژ لینک DC یکسری حالات گذرا ایجاد می‌شود که در ادامه ولتاژ خازن تثبیت می‌شود و مقدار آن پس از گذشت زمان اندکی به مقدار حالت ماندگار خود می‌رسد. شکل‌های (۲۱) و (۲۲) به‌ترتیب توان خروجی پیل سوختی و توان خروجی مبدل (توان لینک DC) را نشان می‌دهند. توان خروجی سامانه پیل سوختی با تغییر جریان تزریقی توسط پیل سوختی تغییر می‌کند. اختلاف بین توان ورودی و خروجی ناشی از تلفات مبدل می‌باشد. با توجه به توان خروجی پیل سوختی و منحنی بازده برحسب توان خروجی آن، بازده سامانه پیل سوختی تحت مطالعه همواره در محدوده‌ی بهینه ۴۰ تا ۶۰ درصد قرار دارد. شکل‌های (۲۳) تا (۲۸) نیز به‌طور مشابه نتایج را به‌ازای اتصال مبدل IBVM نشان می‌دهند. در این روش، هدف کنترل جریانی و توانی پیل سوختی می‌باشد که با نتایج ارائه شده، ملاحظه می‌گردد که اهداف کنترلی به‌خوبی محقق شده‌اند. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که در حضور کنترل‌کننده پیش‌بین، نوسانات خروجی ناچیزی وجود دارد که خود بیانگر عملکرد مناسب کنترل‌کننده پیش‌بین است.



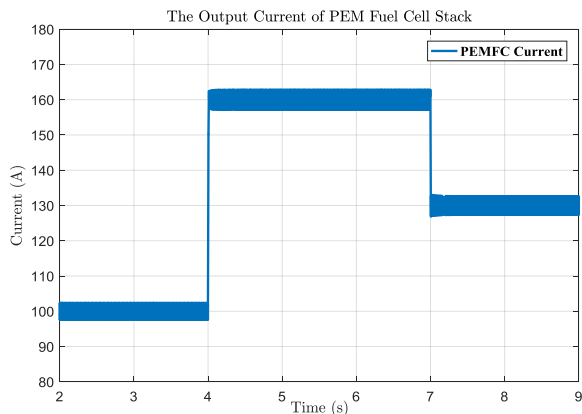
شکل ۱۵. منحنی فشار جزئی آب (H<sub>2</sub>O) برحسب جریان عبوری



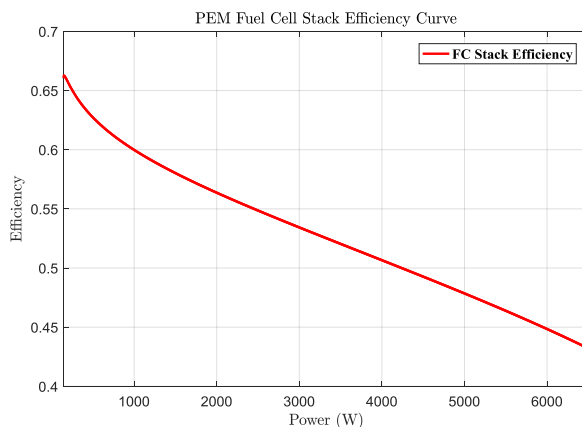
شکل ۱۶. جریان مرجع سلف‌های ورودی برای هر دو مبدا



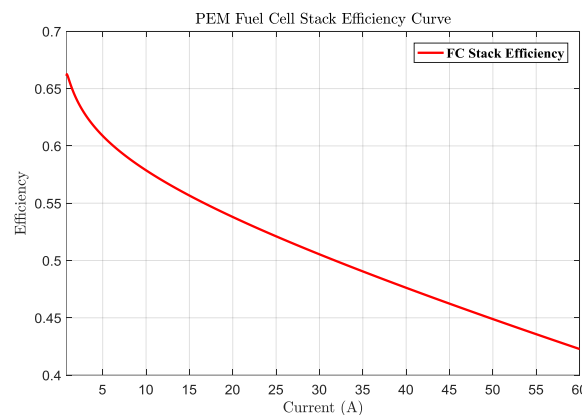
شکل ۱۷. ولتاژ پیل سوختی به‌ازای جریان مرجع در مبدا درهم تنیده



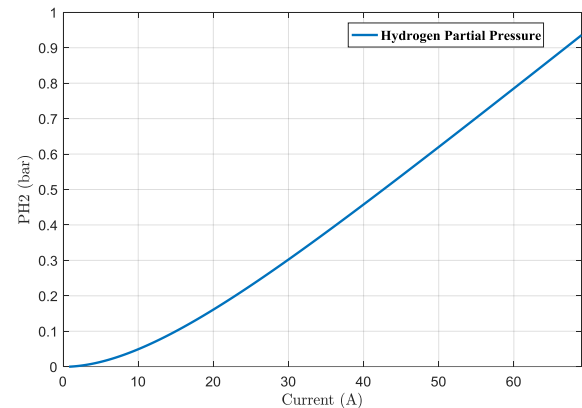
شکل ۱۸. جریان پیل سوختی به‌ازای جریان مرجع در مبدا درهم‌تنیده



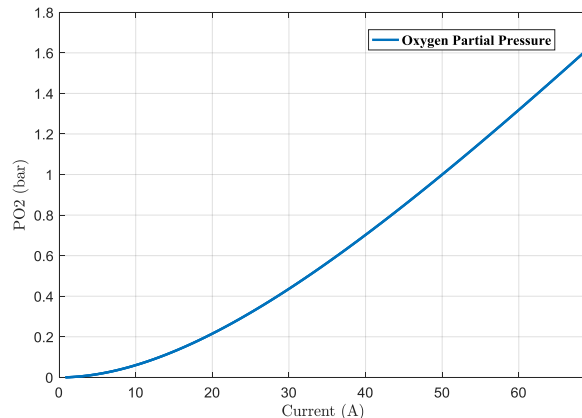
شکل ۱۱. منحنی بازده برحسب توان پیل سوختی PEM



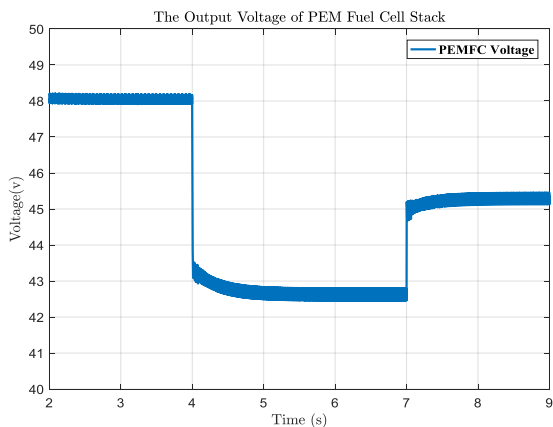
شکل ۱۲. منحنی بازده برحسب جریان در پیل سوختی PEM



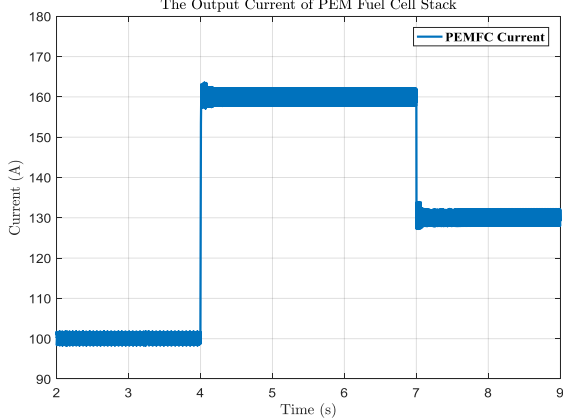
شکل ۱۳. منحنی فشار جزئی گاز هیدروژن (H<sub>2</sub>) برحسب جریان



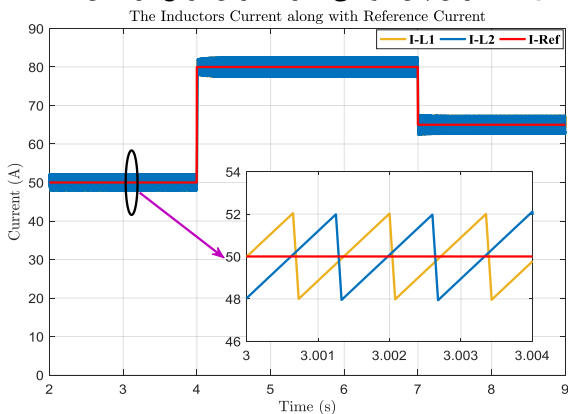
شکل ۱۴. منحنی فشار جزئی گاز اکسیژن (O<sub>2</sub>) برحسب جریان



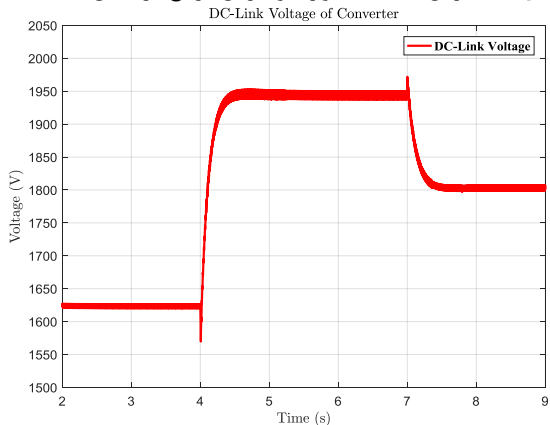
شکل ۲۳. ولتاژ پیل سوختی به‌ازای جریان مرجع در مبدل IBVM



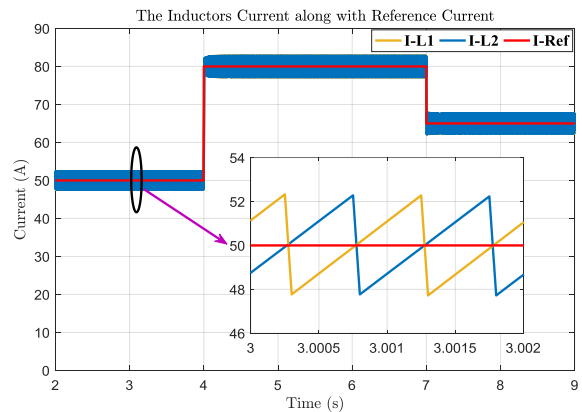
شکل ۲۴. جریان پیل سوختی به‌ازای جریان مرجع در مبدل IBVM



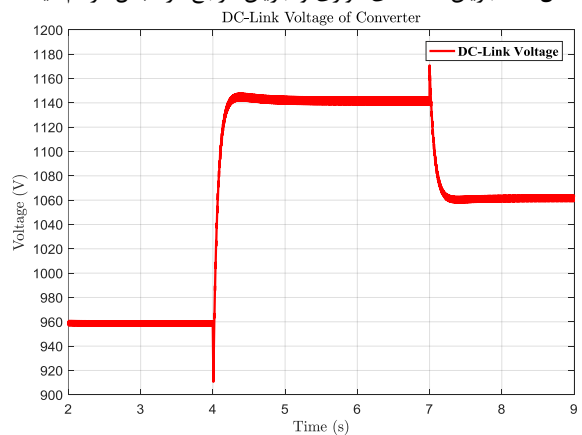
شکل ۲۵. جریان سلف‌های موازی و جریان مرجع در مبدل IBVM



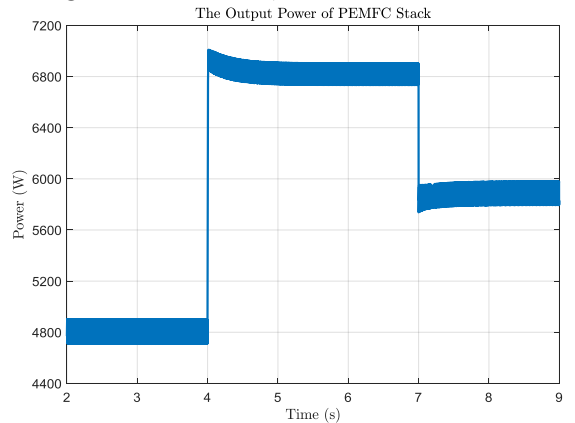
شکل ۲۶. ولتاژ لینک DC مبدل IBVM به‌ازای جریان مرجع ورودی



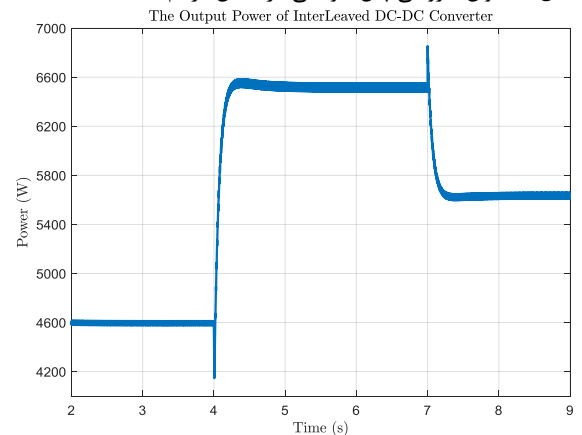
شکل ۱۹. جریان سلف‌های موازی و جریان مرجع در مبدل درهم‌تنیده



شکل ۲۰. ولتاژ لینک DC مبدل درهم‌تنیده به‌ازای جریان مرجع



شکل ۲۱. توان خروجی پیل سوختی در مبدل درهم‌تنیده



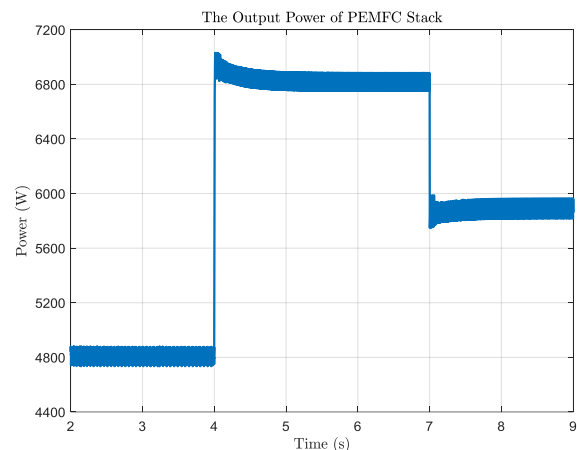
شکل ۲۲. توان لینک DC مبدل درهم‌تنیده به‌ازای جریان مرجع



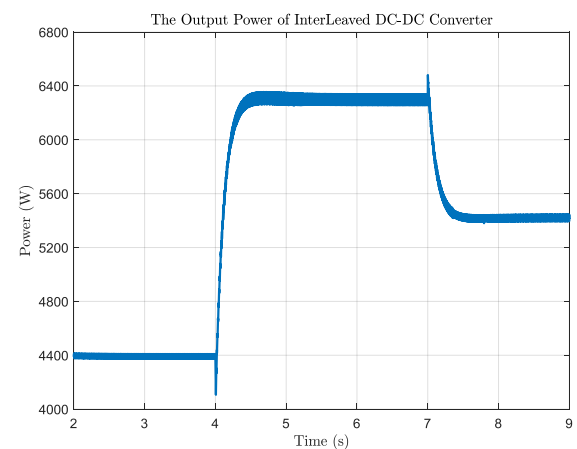
ارائه شده است. روش کنترل پیشنهادی با استفاده از کمینه کردن یک تابع هزینه، که بیانگر رفتار مطلوب مبدل می‌باشد، عمل می‌کند. جریان سلف‌های موازی که همان جریان تزریقی توسط پیل سوختی می‌باشد، به‌طور مستقیم با استفاده از انتخاب کردن حالت کلیدزنی بهینه، کنترل می‌شوند. بررسی میزان کارایی روش پیشنهادی برای هر دو مبدل از طریق نتایج شبیه‌سازی انجام شده است. عملکرد روش پیشنهادی به ازای ایجاد تغییرات پله‌ای در جریان مرجع ارائه شده است. مشاهده شده است که روش پیشنهادی به‌سرعت مقدار مرجع را دنبال کرده و دارای نوسانات جریان و ولتاژ ناچیز و دینامیک سریع می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده مقاوم بودن روش پیشنهادی در برابر تغییرات جریان اخذ شده از منبع پیل سوختی می‌باشد. همچنین یک تقسیم جریان مناسب بین سلف‌های موازی مبدل به‌دست آمده است.

## ۶- مرجع‌ها

- [1] Sharaf, O. Z.; Orhan, M. F. "An Overview of Fuel Cell Technology: Fundamentals and Applications"; *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2014, 32, 810-853.
- [2] Kong, X.; Khambadkone, A. M. "Modeling of a PEM Fuel-Cell Stack for Dynamic and Steady-State Operation Using ANN-Based Submodels"; *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2009, 56, 4903-4914.
- [3] Bassam, A. M.; Phillips, A. B.; Turnock, S. R.; Wilson, P. A. "Development of a Multi-Scheme Energy Management Strategy for a Hybrid Fuel Cell Driven Passenger Ship"; *Int. J. Hydrog. Energy.* 2017, 42, 623-635.
- [4] Banaei, M. R.; Alizadeh, R. "Simulation-Based Modeling and Power Management of All-Electric Ships Based on Renewable Energy Generation Using Model Predictive Control Strategy"; *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.* 2016, 8, 90-103.
- [5] Alizade, E.; Tahvildarzade, D. "Application of Fuel Cell Technology in Ships and Submarines"; *Seventh Conf. Marine Industrial.* 2005.
- [6] Khalkhali, S. H. "Design and Simulation of the Electric Part of the Rail Gun Using Supercapacitors"; *M.Sc. Thesis*, 2018.
- [7] Chowdhury, S.; Crossley, P. "Microgrids and Active Distribution Networks. Energy Engineering Series"; *Institution of Engineering and Technology*, 2009.
- [8] Lipman, T. E.; Weber, A. Z. "Fuel Cells and Hydrogen Production"; *Springer-Verlag*, New York, 2019.
- [9] Puranik, S. V.; Keyhani, A.; Khorrani, F. "State-Space Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell"; *IEEE Trans. Energy Convers.* 2010, 25, 804-813.
- [10] Xie, C.; Ogden, J. M.; Quan, S.; Chen, Q. "Optimal Power Management for Fuel Cell-Battery Full Hybrid Powertrain on a Test Station"; *INT. J. ELEC. POWER.* 2013, 53, 307-320.
- [11] Wu, Y.; Gao, H. "Optimization of Fuel Cell and Supercapacitor for Fuel-Cell Electric Vehicles"; *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2006, 55, 1748-1755.
- [12] Chu, D.; Jiang, R. "Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stacks: Part I: Evaluation and Simulation of an Airbreathing PEMFC Stack"; *J. Power Sources.* 1999, 83, 128-133.



شکل ۲۷. توان خروجی پیل سوختی به‌ازای جریان مرجع مبدل IBVM



شکل ۲۸. توان لینک DC مبدل IBVM به‌ازای جریان مرجع ورودی

به‌طور کلی مبدل IBVM در مقایسه با مبدل افزایش‌دهنده DC-DC در هم‌تنیده، از یک سلول چندبرابر کننده ولتاژ استفاده می‌کند. استفاده از سلول‌های چندبرابر کننده ولتاژ به‌صورت آبشاری با مبدل‌های افزایش‌دهنده در هم‌تنیده، منجر به ایجاد یک ساختار مدولار می‌شود که برای کاربردهایی با ولتاژ خروجی بالا و جریان ورودی بالا مناسب می‌باشد. اضافه کردن این سلول‌ها علاوه بر این‌که قابلیت دستیابی به بهره‌های ولتاژ بالاتر را در مقایسه با مبدل افزایش‌دهنده در هم‌تنیده به‌همراه دارد، منجر به کاهش تنش ولتاژی بر روی کلیدها نیز می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مطالعه جامع بر روی مدل‌سازی دینامیکی و الکتریکی پیل سوختی جهت استخراج مشخصه‌های خروجی آن صورت گرفته است. دو مبدل افزایش‌دهنده DC-DC در هم‌تنیده و IBVM به‌منظور اتصال پیل سوختی به ریزشبه‌ها به‌عنوان منبع تولید توان پیشنهاد شده است. یک مدل کامل زمان-گسسته برای هر دو مبدل به‌منظور پیش‌بینی مقادیر آینده جریان و ولتاژ نیز به‌دست آمده است. سپس یک روش کنترل پیش‌بین برای کنترل حالت جریانی مبدل DC-DC افزایش‌دهنده در هم‌تنیده و مبدل IBVM

- [30] Liu, H.; Li, F.; Ai, J. "A Novel High Step-up Dual Switches Converter with Coupled Inductor and Voltage Multiplier Cell for a Renewable Energy System"; *IEEE Trans. Power Electron.* 2015, 31, 4974–4983.
- [31] Zhang, L.; Shen, G.; Chen, M.; Ioinovici, A.; Xu, D. "Two-Phase Interleaved Boost Converter with Voltage Multiplier under APS Control Method for Fuel Cell Power System"; *Proceedings of the 7th Int. Conf. Power Electronics and Motion Control* 2012.
- [32] Fekri, M.; Molavi, N.; Adib, E. "High Voltage Gain Interleaved DC–DC Converter with Minimum Current Ripple"; *IET Power Electron.* 2017, 10, 1924–1931.
- [33] Zhu, B.; Ren, L.; Wu, X. "Kind of High Step-up DC/DC Converter Using a Novel Voltage Multiplier Cell"; *IET Power Electron.* 2017, 10, 129–133.
- [34] Pirooz, A.; Noroozian, R. "Model Predictive Control of Classic Bidirectional DC-DC Converter for Battery Applications"; *7th Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems Technologies (PEDSTC)* 2016.
- [35] Liang, Y.; Liang, Z.; Zhao, D.; Huangfu, Y.; Guo, L. "Model Predictive Control for Interleaved DC-DC Boost Converter Based on Kalman Compensation"; *IEEE Int. Conf. Power Electronics and Application and Exposition (PEAC)*, 2018.
- [36] Middlebrook, R. D.; Cuk, S. "A General Unified Approach to Modelling Switching-Converter Power Stages"; *IEEE Power Electronics Specialists Conf.* 1976, 73–86.
- [37] He, Y.; Luo, F. L. "Sliding-Mode Control for DC–DC Converters with Constant Switching Frequency"; *IEEE Proc.–Control Theory and Appl* 2006, 37–45.
- [38] Ang, K. H.; Chong, G.; Li, Y. "PID Control System Analysis, Design, and Technology"; *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2014, 13, 559–576.
- [39] Shan, Y.; Hu, J.; Chan, K. W.; Fu, Q.; Guerrero, J. M. "Model Predictive Control of Bidirectional DC–DC Converters and AC/DC Interlinking Converters—A New Control Method for PV-Wind-Battery Microgrids"; *IEEE Trans Sustain Energy.* 2019, 10, 1823–1833.
- [40] Li, X.; Zhang, H.; Shadmand, M. B.; Balog, R. S. "Model Predictive Control of a Voltage-Source Inverter with Seamless Transition between Islanded and Grid Connected Operations"; *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 64, 7906–7918.
- [41] Spiegel, C. "PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab"; *Academic Press*, 2008.
- [42] Pukrushpan, J. T.; Peng, H.; Stefanopoulou, A. G. "Control of Fuel Cell Power System: Principles, Modelling, Analysis and Feedback Design"; *Springer*, 2004.
- [43] Padulles, J.; Ault, G. W.; McDonald, J. R. "An Integrated SOFC Plant Dynamic Model for Power Systems Simulation"; *J. Power Sources.* 2000, 86, 495–500.
- [44] Correa, J. M.; Farret, F. A.; Canha, L. N.; Simoes, M. G. "An Electrochemical-Based Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach"; *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2004, 51, 1103–1112.
- [45] Torreglosa, J. P.; García, P.; Fernández, L. M.; Jurado, F. "Predictive Control for the Energy Management of a Fuel-Cell–Battery–Supercapacitor Tramway"; *IEEE Trans Industr Inform.* 2014, 10, 276–285.
- [46] Fathy, A.; Rezk, H.; Nassef, A. M. "Robust Hydrogen-Consumption-Minimization Strategy Based Salp Swarm Algorithm for Energy Management of Fuel Cell/Super
- [13] Friede, W.; Rael, S.; Davat, B. "Mathematical Model and Characterization of the Transient Behavior of a PEM Fuel Cell"; *IEEE Trans. Power Electron.* 2004, 19, 1234–1241.
- [14] Jia, J.; Li, Q.; Wang, Y.; Cham, Y. T.; Han, M. "Modeling and Dynamic Characteristic Simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell"; *IEEE Trans. Energy Convers.* 2009, 24, 283–291.
- [15] Restrepo, C.; Konjedic, T.; Garces, A.; Calvente, J.; Giral, R. "Identification of a Proton-Exchange Membrane Fuel Cell's Model Parameters by Means of an Evolution Strategy"; *IEEE Trans Industr Inform.* 2015, 11, 548–559.
- [16] Baschuk, J. J.; Li, X. "Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with Variable Degrees of Water Flooding"; *J. Power Sources.* 2000, 86, 181–196.
- [17] Busquet, S.; Hubert, C. E.; Labbe, J.; Mayer, D.; Metkemeijer, R. "A New Approach to Empirical Electrical Modelling of a Fuel Cell, an Electrolyser or a Regenerative Fuel Cell"; *J. Power Sources.* 2004, 34, 41–48.
- [18] Marquezini, D. D.; Ramos, D. B.; Machado, R. Q.; Farret, F. A. "Interaction between Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Power Converters for AC Integration"; *IET Renew. Power Gener.* 2008, 2, 151–161.
- [19] Xuewei, P.; Rathore, A. K. "Novel Bidirectional Snubberless Naturally Commutated Soft-Switching Current-Fed Full-Bridge Isolated DC/DC Converter for Fuel Cell Vehicles"; *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, 61, 2307–2315.
- [20] Hwu, K. I.; Peng, T. J. "A Novel Buck–Boost Converter Combining KY and Buck Converters"; *IEEE Trans. Power Electron.* 2012, 27, 2236–224.
- [21] Tao, H.; Duarte, J. L.; Hendrix, M. A. M. "Line-Interactive UPS Using a Fuel Cell as the Primary Source"; *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008, 55, 3012–3021.
- [22] Liao, H.; Liang, T.; Yang, L.; Chen, J. "Non-Inverting Buck–Boost Converter with Interleaved Technique for Fuel-Cell System"; *IET Power Electron.* 2012, 5, 1379–1388.
- [23] Lee, S.; Park, J.; Choi, S. "A Three-Phase Current-Fed Push–Pull DC–DC Converter With Active Clamp for Fuel Cell Applications"; *IEEE Trans. Power Electron.* 2011, 26, 2266–2277.
- [24] Leyva-Ramos, J.; Lopez-Cruz, J. M.; Ortiz-lopez, M. G.; Diaz-Saldierna, L. H. "Switching Regulator Using a High Step-up Voltage Converter for Fuel-Cell Modules"; *IET Power Electron.* 2013, 6, 1626–1633.
- [25] Choe, J. L. S.; Baek, J. A. S. "Modelling and Simulation of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell System with a PWM DC/DC Converter for Stationary Applications"; *IET Power Electron.* 2008, 1, 305–317.
- [26] Choi, S.; Agelidis, V. G.; Yang, J. "Analysis, Design and Experimental Results of a Floating-Output Interleaved-Input Boost-Derived DC–DC High-Gain Transformer-Less Converter"; *IET Power Electron.* 2011, 4, 168–180.
- [27] Tseng, K.; Lin, J.; Huang, C. "High Step-up Converter with Three Winding Coupled Inductor for Fuel Cell Energy"; *IEEE Trans. Power Electron.* 2015, 30, 574–581.
- [28] Dwari, S.; Parsa, L. "An Efficient High Step-up Interleaved DC–DC Converter with a Common Active Clamp"; *IEEE Trans. Power Electron.* 2011, 26, 66–78.
- [29] Thounthong, P.; Sethakul, P.; Rael, S. "Fuel Cell Current Ripple Mitigation by Interleaved Technique for High Power Applications"; *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, TX, USA, 2009, 1–8.*

- [50] Liu, H.; Hu, H.; Wu, H. "Overview of High Step-up Coupled-Inductor Boost Converters"; IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2016, 4, 689–704.
- [51] Karamanakos, P.; Papafotiou, G.; Manias, S. N. "Model Predictive Control of the Interleaved DC-DC Boost Converter"; 15th Int. Conf. on System Theory, Control and Computing, Sinaia, 2011, 1-6.
- [52] Beygi, M.; Dehestani Kolagar, A.; Alizadeh Pahlavani, M. R. "Utilizing MPC Controlled Multilevel Neutral Point Clamped Rectifier for Supplying Loran Transmitter"; Adv. Defence Sci. Technol. 2020, 2, 155-165 (In Persian).
- [53] Spiazzi, G.; Buso, S.; Sichirollo, F. "Small-Signal Modeling of the Interleaved Boost with Voltage Multiplier"; IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2012, 456–461.
- Capacitor/Batteries in Highly Fluctuated Load Condition"; Renew. Energ. 2019, 139, 147-168.
- [47] Wang, Y.; Sun, Z.; Chen, Z. "Development of Energy Management System Based on a Rule-Based Power Distribution Strategy for Hybrid Power Sources"; Energy. 2019, 175, 1055-1066.
- [48] Wang, C.; Nehrir, M. H.; Shaw, S. R. "Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits"; IEEE Trans. Energy Convers. 2005, 20, 442-451.
- [49] Djerioui, A.; Houari, A.; Zeghlache, S.; Saim, A.; Benkhoris, M. F.; Mesbahi, T.; Machmoum, M. "Energy Management Strategy of Super Capacitor/Fuel Cell Energy Storage Devices for Vehicle Applications"; Int. J. Hydrog. Energy. 2019, 44, 23416-23428.