

## کنترل سیستم تولید پراکنده مبتنی بر پیل سوختی غشاء الکترولیت پلیمری با رویکرد بهبود کیفیت ولتاژ خروجی

صارم حاجتی شیمنی

دانشکده مهندسی برق، موسسه آموزش عالی پیام گلپایگان، اصفهان، ایران

سید موسی آیتی

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

سیستم‌های پیل سوختی دارای مزایای متعددی نسبت به دیگر منابع تولید انرژی هستند و چشم‌انداز امیدبخشی برای آنها وجود دارد. با این حال، برای دستیابی به عملکرد مطلوب این سیستم‌ها، ارائه استراتژی مناسب برای کنترل آنها ضروری است. در این مقاله، یک مدل دینامیکی برای پیل سوختی با غشای تبادل پروتون (PEMFC) ارائه شده و رفتار دینامیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ارائه شده شامل پیل سوختی، مبدل باک و یک اینورتر قدرت است که در محیط MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده است. بررسی دینامیک پیل سوختی نشان می‌دهد که ولتاژ خروجی پیل سوختی به شدت تحت تأثیر تغییرات بار خروجی قرار می‌گیرد. بنابراین، برای استفاده از پیل سوختی در تولید انرژی، کنترل ولتاژ خروجی ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله، کنترل‌کننده‌های PID و فازی برای کنترل ولتاژ خروجی پیل سوختی پیشنهاد شده و عملکرد آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده فازی عملکرد بهتری در بهبود ولتاژ خروجی دارد.

**واژگان کلیدی:** پیل سوختی، کنترل فازی، مبدل باک، PEMFC.

## ۱- مقدمه

با توجه به گسترش مصرف انرژی و تمایل جهانی به تولید انرژی در مبادی مصرف، ابزارهای متنوع تولید پراکنده و نمونه های تجاری صنعتی آنها جایگاه ویژه ای یافته اند. در واقع، منابع تولید پراکنده، منابع تولید برق هستند که مستقیماً به شبکه یا مصرف کننده متصل می باشند. سطح ولتاژ این منابع تولید پراکنده از ۴۰۰ ولت تا حداکثر ۳۳ کیلوولت و ظرفیت آنها در محدوده چند وات تا حداکثر ۱۰۰ مگاوات قرار دارد. انواع متنوعی از ابزارهای مبتنی بر انرژی های فسیلی و تجدیدپذیر همراه با ابزارهای ذخیره سازی انرژی برای تولید پراکنده موجود هستند، از جمله موتورهای احتراقی، میکروتوربین ها، پیل های سوختی، دیزل ژنراتورها، توربین های بادی و سلول های خورشیدی. پیل های سوختی ابزارهایی هستند که انرژی شیمیایی را مستقیماً به الکتریسیته و گرما تبدیل می کنند. امروزه، پیل های سوختی پس از پیشرفت تکنولوژی ساخت، کاربردهای گسترده ای در صنایع مختلف از جمله میکروالکترونیک، خودروهای الکتریکی، کشتی های کوچک، هواپیماهای جاسوسی، اتوبوس ها و کاربردهای خانگی و تجاری، از جمله سیستم های CHP (تولید همزمان حرارت و برق) یافته اند. پیل های سوختی غشاء الکترولیت پلیمری (PEMFC) یکی از انواع پیل های سوختی هستند که در سال های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. این نوع از پیل های سوختی از یک غشاء الکترولیت پلیمری برای انتقال پروتون ها بین الکترودها استفاده می کنند. ویژگی های اصلی PEMFC شامل دمای عملکرد نسبتاً پایین (حدود ۸۰ درجه سانتیگراد)، پاسخ دینامیکی سریع، چگالی توان بالا، امکان مقیاس پذیری و قابلیت استفاده در کاربردهای متنوع هستند. این ویژگی ها سبب شده است که PEMFC به عنوان یک گزینه مناسب برای تولید پراکنده برق مورد توجه قرار گیرند. در سیستم های تولید پراکنده، PEMFC می تواند به عنوان منابع تولید برق کارا و پاک مورد استفاده قرار گیرند. برخی کاربردهای مهم PEMFC در تولید پراکنده برق عبارتند از: تأمین برق برای ساختمان ها و مناطق مسکونی، نیروگاه های کوچک مقیاس در مناطق دورافتاده، سیستم های تأمین برق اضطراری و منابع تأمین برق برای حمل و نقل الکتریکی. بنابراین، توسعه و بهبود عملکرد سیستم های تولید پراکنده مبتنی بر PEMFC به منظور افزایش کارایی و کیفیت ولتاژ خروجی از اهمیت زیادی برخوردار است. در زمینه کنترل سیستم های تولید پراکنده مبتنی بر PEMFC، یکی از چالش های اصلی بهبود کیفیت ولتاژ خروجی است. این چالش ناشی از چندین عامل مختلف است:

- ۱- نوسانات بار مصرف کننده: نوسانات در میزان بار مصرفی می تواند باعث ایجاد نوسانات در ولتاژ خروجی سیستم شود.
- ۲- تغییرات پارامترهای پیل سوختی: پارامترهای عملکردی پیل های سوختی مانند دما، فشار، و میزان هیدروژن و اکسیژن ورودی ممکن است در طول عملکرد دستخوش تغییرات شوند که این امر می تواند بر ولتاژ خروجی تأثیر بگذارد.
- ۳- اثرات دینامیکی: پیل های سوختی دارای پاسخ دینامیکی سریع به تغییرات بار هستند که می تواند باعث ایجاد نوسانات ولتاژ شود. برای بهبود کیفیت ولتاژ خروجی در چنین سیستم هایی، طراحی استراتژی های کنترلی مناسب ضروری است. این استراتژی ها باید قادر باشند تا با تغییرات سریع در بار و پارامترهای پیل سوختی مقابله کرده و ولتاژ خروجی را در محدوده مطلوب حفظ کنند. برخی از رویکردهای کنترلی که می توانند در این زمینه مورد استفاده قرار گیرند عبارتند از:

- کنترل مبتنی بر منطق فازی
- کنترل تطبیقی
- کنترل مدل پیش بین
- ترکیب استراتژی های کنترلی مختلف

با به کارگیری این رویکردهای کنترلی پیشرفته و تلفیق آنها با طراحی مناسب سایر اجزای سیستم، می توان کیفیت ولتاژ خروجی سیستم های تولید پراکنده مبتنی بر PEMFC را به طرز چشمگیری بهبود داد.

یکی از چالش های اساسی در استفاده از پیل های سوختی، کاهش قابل ملاحظه ولتاژ خروجی با افزایش جریان بار است. بنابراین، ضروری است که ولتاژ خروجی پیل های سوختی توسط تجهیزات الکترونیک قدرت مناسب تنظیم شود. در این زمینه، استفاده از مبدل های بوسـت DC-DC که به یک اینورتر سه فاز متصل هستند، رایج تر است. برای تولید انرژی الکتریکی از پیل های سوختی، ضروری است که ولتاژ خروجی پیل در برابر بارهای مختلف، ثابت باقی بماند تا بتوان توان با کیفیت بالا به بار اعمال کرد. با این حال، ولتاژ خروجی پیل های سوختی با تغییر بار، تغییر می کند. بنابراین، استفاده از یک کنترل کننده برای ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی پیل، ضروری است.

اهمیت کیفیت انرژی الکتریکی امروزه بیش از پیش مورد توجه شرکت های برق و مصرف کنندگان قرار گرفته است. دلیل این توجه فزاینده، تأثیرات مخرب کیفیت پایین برق بر بارهای حساس است. کیفیت بالا یا پایین برق، به میزان انحراف ولتاژ یا جریان از شرایط ایده آل (دامنه فرکانس نامی و شکل موج سینوسی) تعریف می شود. عواملی چون اغتشاش های موجود در شبکه برق، باعث ایجاد این انحرافات می شوند. در سیستم های پیل سوختی نیز، کنترل ولتاژ خروجی امری ضروری است تا بتوان از این منبع برای تولید انرژی الکتریکی با کیفیت بالا استفاده کرد. در این مقاله، به منظور بهبود کیفیت ولتاژ خروجی سیستم پیل سوختی، استفاده از کنترل کننده های PID و فازی پیشنهاد شده است.

## ۲- پیل سوختی غشاء پروتون (PEMFC)

سلول های سوختی غشای تبادل پروتون (PEMFC) یک منبع انرژی پاک امیدوارکننده برای کاربردهای مختلف صنعتی است که از انتشار صفر، راندمان بالا و همچنین دمای کاری پایین بهره می برد (چاتاتانوت و همکاران، ۲۰۱۷). برای پاسخگویی به تقاضای برق، مانند ولتاژ سرویس پایدار و ثابت، یا جریان خروجی مطلوب، PEMFC معمولاً توسط مبدل های DC-DC برای پیکربندی منبع تغذیه DC با تغذیه PEMFC استفاده می شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ والدز رزنز و همکاران، ۲۰۱۷). مبدل های DC-DC به عنوان تهویه کننده قدرت برای افزایش/کاهش ولتاژ خروجی و تنظیم جریان سلف عمل می کنند. در یک کاربرد خودرو، ولتاژهای بالا و پایین برای تغذیه موتور و وسایل مورد نیاز است، جایی که پیوند DC پایین بر اساس مبدل باک که توسط نسبت تبدیل ولتاژ ورودی-خروجی بالا کنترل می شود (افشاری نژاد و همکاران، ۲۰۲۲). به طور خاص، گزارش شده است که PEMFC با مبدل های حالت کاهنده، ولتاژ پایانه ثابتی را برای یک ژنراتور سنکرون به صورت لحظه ای تامین می کند (بایرام و همکاران، ۲۰۱۷) و بسته باتری را در حالت ولتاژ یا جریان ثابت شارژ می کند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

یک مبدل باک DC-DC عمومی در حالت هدایت پیوسته (CCM) ویژگی های خطی را نشان می دهد، در حالی که پارامترهای داخلی متغیر زمانی هستند یا حتی ناهماهنگ هستند، و تقاضای بار خارجی نیز می تواند تغییر کند که منجر به عدم قطعیت و همچنین اختلال می شود. رویکردهای کنترل قوی مانند نابرابری های ماتریس خطی (LMI) همراه با یک کنترل کننده فازی Takagi-Sugeno (T-S) (لیان و همکاران، ۲۰۰۶) و یک روش  $\mu$  مبتنی بر ارزش منفرد (سامساروا و همکاران، ۲۰۱۷) برای حل استحکام زمانی که عدم قطعیت و اختلال در نظر گرفته شود. برای اعمال طرح های کنترل بهینه برای دستیابی به به حداقل رساندن شاخص عملکرد با پایداری قوی، یک نابرابری های ماتریس خطی و کنترل تنظیم کننده خطی-درجه دوم (LMI-LQR) معرفی شد که در نهایت یک مسئله بهینه سازی محدب تبدیل شد (اولالا و همکاران، ۲۰۰۹). علاوه بر این، یک برآوردگر اغتشاش برای مشاهده اختلال ناشی از تغییرات بار (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵) و تخمین پارامتر زمان واقعی بر اساس فیلتر کالمن (احمد و همکاران، ۲۰۱۶) برای بهبود عملکرد ردیابی تحت شرایط کار مبدل باک اختلال و اغتشاش پارامتر مدل ارائه شد. یک کنترل ساختار متغیر بر اساس کنترل حالت لغزشی (SMC) به عنوان یک روش قدرتمند برای تنظیم مبدل های DC-DC در نظر گرفته شده است. کنترل حالت لغزشی هنگامی که در مبدل های DC/DC اعمال می شود مزایای زیادی مانند پایداری در محدوده وسیع، استحکام در برابر ارتعاشات پارامترها و پاسخ دینامیکی سریع از خود نشان می دهد. با این حال، نوسانات ردیابی وضعیت در اطراف منی فولد لغزنده ممکن است باعث ایجاد یک پدیده پیچ پیچ شود. دینگ و همکاران (۲۰۱۷) یک حالت لغزشی مرتبه دوم (SOSM) را برای دستیابی به مشکلات ردیابی ولتاژ خروجی در حضور عدم قطعیت های مدل و اغتشاشات خارجی پیشنهاد کردند و نتایج نشان داد که SOSM پاسخ دینامیکی سریع تر و پدیده چتر کوچک تری در مقایسه با مرتبه اول دارد. برای از بین بردن پدیده چتر، می توان از طرح پشت سر هم در ترکیب با SMC استفاده کرد. مزیت طرح پشتیبان این است که سیستم را به چندین زیرسیستم خطی تقسیم می کند و هر کدام به راحتی کنترل می شوند. روش های Backstepping به طور گسترده در کنترل مبدل DC-DC استفاده شده است. یک کنترل مبتنی بر پس گام برای حل مسائل قوی غیرخطی های مدل نشده و دینامیک مبدل تقویت کننده پیشنهاد شد (هرناندز مندز و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر این، کنترل تطبیقی می تواند عدم قطعیت های سیستم، مانند پارامترهای متغیر و ناهماهنگ بودن، و همچنین اختلالات خارجی را کنترل کند. برآورد اغتشاشات سیستم شامل تغییرات خازن، اندوکتانس و مقاومت بار (سلیمی و همکاران، ۲۰۱۳؛ زانیگا ونتورا و همکاران، ۲۰۱۸) و مشاهده جریان سلف (نیزامی و همکاران، ۲۰۱۸) با توجه به تکنیک های پس گام

تطبیقی برای بهبود استحکام توسعه داده شد. بنابراین، مطالعات نشان می‌دهند که با پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌های مختلف مرتبط با پیل‌های سوختی، امکان بهبود قابل توجه کیفیت ولتاژ خروجی وجود دارد. در این پژوهش، سیستم منبع تغذیه از یک مبدل باک PEMFC و DC/DC تشکیل شده است. PEMFC برق تولید می‌کند و مبدل باک DC/DC جریان بار را تنظیم می‌کند یا ولتاژ خروجی را تثبیت می‌کند، که می‌تواند برای شارژ جریان ثابت باتری یا شارژ ولتاژ ثابت در وسایل نقلیه الکتریکی استفاده شود. در ادامه مدل PEMFC را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

## ۲-۱- مدل PEMFC

معادلات (۱) و (۲) به ترتیب شامل ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی PEMFC هستند. اثر خازن دو لایه متغیر برای شبیه سازی دینامیک PEMFC اعمال می‌شود (جیاریس و همکاران، ۲۰۱۲):

$$v_{fc} = NE_{Nernst} - V_{ohm} - V_{con} - V_c \quad (1)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C_{act}} i_{fc} - \frac{V_c}{R_{act}} \quad (2)$$

که در آن  $i_L$  جریان القایی و  $v_o$  ولتاژ بار خروجی است.  $u$  وضعیت سوئیچ را نشان می‌دهد، از صفر (سوئیچ خاموش است) تا ۱ (سوئیچ روشن است). مدل معادلات را برای انتقال الکترون، معادله ماکسول - استفان و قانون دارسی برای شارش بار در بر می‌گیرد. این شامل لایه‌های راکتیو و الکترولیتی است. معادلات حاکم بر آن شامل چندین معادله‌اند. تعادل جریان یونی در کاتد به وسیله معادله (۳) انجام می‌گیرد:

$$\nabla \cdot (\sigma_l^{eff} \nabla \phi_l) = -A i_{ct} \quad (3)$$

که رسانایی الکترولیتی موثر،  $\sigma_l$  پتانسیل الکترولیتی،  $A$  سطح و  $i$  چگالی جریان انتقال بار محلی است. تعادل جریان یونی در الکترولیت بین کاتد و کاتد به صورت رابطه (۴) است:

$$\nabla \cdot (\sigma_l \nabla \phi_l) = 0 \quad (4)$$

که رسانایی الکترولیتی است. تعادل بار الکترونیکی در زیر دامنه الکتروود به صورت رابطه (۵) است:

$$\nabla \cdot (\sigma_s^{eff} \nabla \phi_s) = -A i_{ct} \quad (5)$$

که رسانایی موثر در فاز جامد و  $\phi_s$  پتانسیل فاز جامد است که بر حسب ولت بیان می‌شود. چگالی جریان انتقال بار که برای در نظر گرفتن تعادل جرم و جریان در نظر گرفته می‌شود به صورت زیر است:

$$i_{ct} = i_o \left[ e^{\phi} - \frac{CO_2}{CO_{2,ref}} \right], \quad (6)$$

$$\phi = \frac{0.5F(\phi_s - \phi_l - \Delta\phi_{eq})}{KT},$$

که اختلاف پتانسیل تعادل بر حسب ولت است،  $F$  ثابت فارادی و  $K$  ثابت گاز است و  $CO_2$  غلظت اکسیژن است. انتقال جرم به وسیله معادله ماکسول - استفان برای اکسیژن و آب در فاز گاز داده می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w_i) + \nabla \cdot (\rho V w_i) + \nabla \cdot J_i = S_{ai} \quad (7)$$

که  $w_i$  تابع جرم گونه  $i$  ام،  $J_i$  شار جرم ساطع نام و منبع اضافی نام است. فرض کنید که هوا اشباع شده که در این صورت واکنش هیچ بخار آبی تولید نکرد. محیط پر منفذ توسز قانون دارسی و معادله تبدیل جرم به صورت زیر اداره می‌شود:

$$V = -\frac{k_p}{v} \nabla p \quad (8)$$

$$\nabla \cdot (\rho V) = s$$

که  $V$  بردار سرعت،  $k_p$  ضریب نفوذ پذیری،  $v$  سرعت،  $p$  فشار،  $\rho$  چگالی و  $S$  عبارت منبع است.

## ۲-۲- مدل استاتیکی PEMFC

مدلسازی استاتیکی سلول های سوخت پلیمری (PEMFC) یک روش رایج برای تحلیل و طراحی این نوع سلول های سوخت است. این مدل استاتیکی کمک می کند تا رفتار سلول سوخت را در حالت ماندگار بررسی نماییم. برخی ویژگی های مهم این مدل عبارتند از:

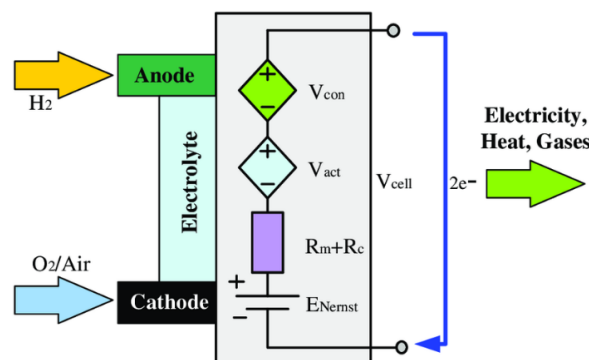
۱. منحنی ولتاژ-جریان: این مدل به شما امکان می دهد تا منحنی ولتاژ-جریان سلول را ترسیم کرده و مشخصات عملکردی آن را بررسی کنید. این شامل محاسبه ولتاژ تحت بارهای مختلف و راندمان سلول است.
۲. تلفات ولتاژ: مدل استاتیکی تلفات ولتاژ ناشی از پدیده های ماندگاری، فعال سازی و انتقال جرم را محاسبه می کند و به شما کمک می کند تا راهکارهایی برای کاهش این تلفات ارائه دهید.
۳. طراحی اجزا: با استفاده از این مدل می توانید پارامترهای طراحی اجزای مختلف سلول سوخت مانند الکترودها، غشا و صفحات دو سر را بهینه کنید.

۴. مدلسازی شرایط عملیاتی: مدل استاتیکی به شما امکان می دهد تا اثر متغیرهای عملیاتی مانند فشار، دما و رطوبت را بر روی عملکرد سلول بررسی کنید.

در مجموع، مدلسازی استاتیکی PEMFC ابزار مفیدی برای درک، طراحی و بهینه سازی سلول های سوخت پلیمری است. این مدل همچنین می تواند به عنوان پایه و اساسی برای مدل های پیشرفته تر مانند مدل های دینامیکی استفاده شود.

در شکل (۱)، سیستم PEMFC نمایش داده شده است. ولتاژ نرنست (ENernst) نشان دهنده پتانسیل الکتریکی سلول است و بیانگر ولتاژ برگشت پذیر یا ایده آل خروجی می باشد. این ولتاژ می تواند از طریق یک نسخه اصلاح شده از معادله نرنست با اضافه کردن یک جزء برای در نظر گرفتن تغییرات دما محاسبه شود. تلفات موجود در سلول سوختی شامل تلفات فعال سازی پلاریزاسیون، تلفات پلاریزاسیون اهمی و تلفات پلاریزاسیون غلظت هستند. با استفاده از مقادیر دما و فشار استاندارد، معادله نرنست برای سلول سوختی هیدروژن، اکسیژن به صورت رابطه (۹) است:

$$E_{\text{cell}} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} \times T \times (\ln P_{H_2} + 0.5 \times 0.5 \times \ln P_{O_2}) \quad (9)$$



شکل (۱): سیستم پیل های سوختی غشاء پروتون

## ۳- مبدل DC-DC کاهنده (Buck)

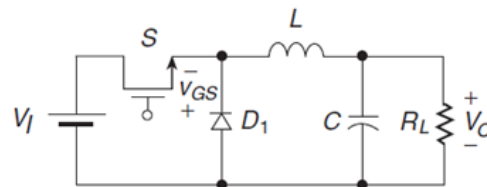
این بخش مبدل سوئیچینگ PWM از نوع Buck را بررسی می کند که معمولاً به آن برشگر می گویند. تحلیل ها برای هر دو حالت هدایت پیوسته (CCM) و حالت هدایت گسسته (DCM) داده شده است. شکل موج های ولتاژ و جریان برای تمامی اجزای مبدل استخراج شده اند. تابع ولتاژ DC برای هر دو حالت به دست آمده است. عبارت های ولتاژ و جریان اجزا به دست می آید و مرز بین CCM و DCM مشخص می گردد.

### ۳-۱- تحلیل DC مبدل Buck به روش PWM برای حالت CCM

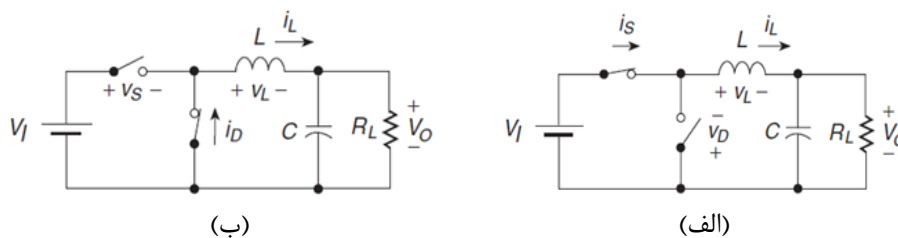
مدار چنین مبدل باک به روش PWM برای حالت CCM در شکل (۲) نشان داده شده است. این مدار شامل چهار جزء است: یک MOSFET قدرت که به عنوان کلید قابل کنترل S به کار می رود؛ یک دیود D1؛ یک سلف L و یک خازن فیلتر C. مقاومت RL نمایانگر یک بار DC است. MOSFET های قدرت رایج ترین کلیدهای قابل کنترلی هستند که در مبدل های DC-DC استفاده می شوند که این امر به دلیل سرعت بالایشان است. کلیدهای قدرت دیگر مانند ترانزیستورهای دو قطبی BJT، ترانزیستورهای دو قطبی با گیت عایق شده (IGBT) یا ترانزیستورهای کنترل شده توسط MOSFET نیز می توانند استفاده شوند. دیود D1 را دیود چرخ آزاد یا چرخ طیار catch diode گویند. شبکه کلیدزنی متشکل از ترانزیستور و دیود، ولتاژ ورودی DC  $V_I$  را می برد و بنابراین به مبدل برشگر گوییم که یک ولتاژ متوسط کاهش یافته را تولید می کند. کلید S توسط یک مدولاتور پهنای باند کنترل می شود و در فرکانس کلیدزنی  $f_s = 1/T$  روشن و خاموش می گردد و ضریب وظیفه به صورت زیر است:

$$f_s = (T_{OFF} + T_{ON}) / T_{ON} = T / T_{ON} = T_{ON} \cdot D \quad (5)$$

فاصله  $T_{ON}$  فاصله زمانی است که کلید S بسته است و  $T_{OFF}$  مدت زمانی است که کلید S باز است. از آنجا که ضریب وظیفه «D» ولتاژ تحریک  $V_{GS}$  تغییر می کند، شکل موجهای دیگر نیز تغییر می کنند. این امر موجب تنظیم ولتاژ خروجی DC علیرغم تغییرات در ولتاژ DC ورودی  $V_I$  و مقاومت بار  $R_L$  (یا جریان بار) می گردد. ولتاژ خروجی  $V_O$  مبدل همیشه کمتر از ولتاژ ورودی  $V_I$  است. بنابراین این یک مبدل کاهنده است. مبدل Buck ولتاژ را به سطح پایین تری کاهش می دهد. از آنجا که گیت MOSFET زمین نشده است، راه اندازی ترانزیستور سخت است. مبدل به یک تحریک گیت شناور نیازمند است. اگر جریان ورودی مبدل گسسته باشد یک فیلتر LC صافی ممکن است در ورودی نیاز باشد. مبدل Buck بسته به شکل موج جریان سلف می تواند در حالت های CCM و DCM کار کند. در CCM جریان سلف در طول کل سیکل جریان دارد در حالیکه جریان سلف در DCM تنها در بخشی از سیکل جاری است. در حالت DCM این جریان به صفر می رسد؛ در صفر برای مدت زمانی باقی می ماند و سپس شروع به افزایش می کند. عملکرد در مرز بین دو حالت CCM و DCM را حالت بحرانی گویند. در شکل (۳) مدارهای معادل مبدل Buck را برای CCM ارائه شده است، که در شکل (۳-الف) کلید S بسته و دیود D1 خاموش و در شکل (۳-ب) کلید S باز و دیود روشن است.



شکل (۲): مدار مبدل Buck



شکل (۳): مدارهای معادل مبدل Buck

عملکرد مبدل با شکل موجهای ولتاژ و جریان ایده ال طبق شکل (۴) نشان داده شده است. در زمان  $t = 0$  کلید توسط راه انداز بسته می شود. بنابراین ولتاژ دیود برابر  $V_D = -V_I$  می گردد که موجب بایاس معکوس دیود می شود. ولتاژ سلف در این حالت  $V_L = V_I - V_O$  است و بنابراین جریان سلف به صورت خطی با شیب  $(V_I - V_O)/L$  افزایش می یابد. جریان سلف  $i_L$  در کلید جاری می شود؛ بنابراین  $i_L = i_S$  می شود. در این مدت زمان انرژی از منبع ولتاژ DC ورودی  $V_I$  به سلف، خازن و بار منتقل می شود. در زمان  $t = T \cdot D$  کلید توسط راه انداز باز می گردد. سلف زمانی که کلید باز است جریان غیر صفر دارد. از آنجا که شکل موج جریان سلف تابع پیوسته ای از زمان است؛ جریان سلف پس از آنکه کلید باز شود همچنان به جریان یافتن در همان جهت ادامه می دهد. بنابراین سلف L به صورت یک منبع جریان عمل

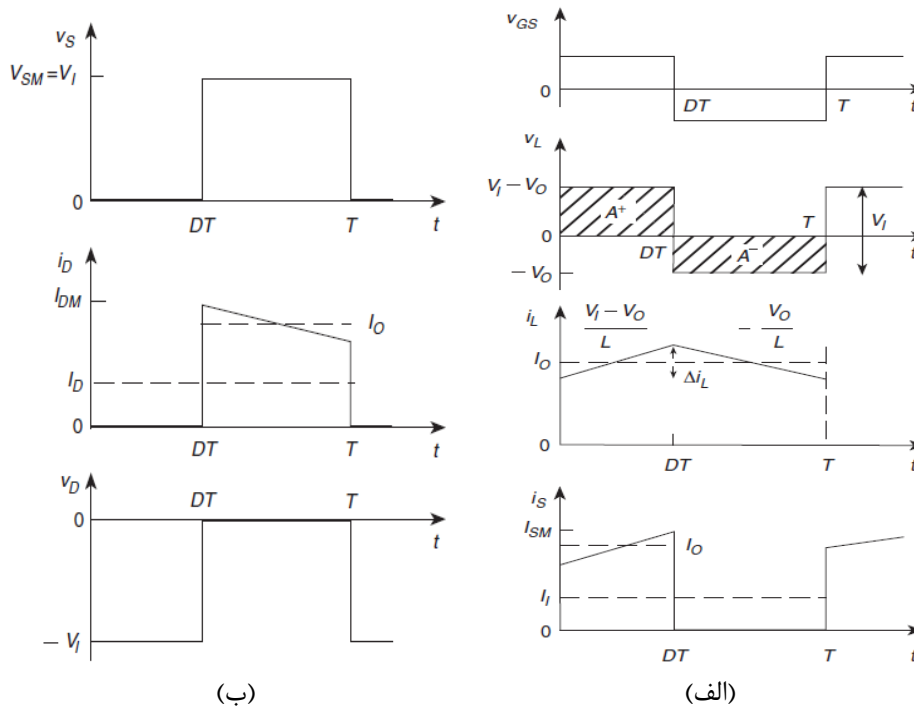
می کند که دیود را وادار به روشن شدن می کند. ولتاژ کلید VI است و ولتاژ سلف VO می باشد. بنابراین جریان سلف با شیب  $VO/L$  - به طور خطی کاهش می یابد. در طول این مدت منبع ورودی VI از مدار جدا شده و انرژی را به بار و مدار LC نمی فرستد. سلف و خازن یک مخزن انرژی را تشکیل می دهند که جریان و ولتاژ بار را وقتی کلید باز است نگه می دارند. در زمان  $t=T$  کلید دوباره بسته می شود. جریان سلف افزایش می یابد و بنابراین انرژی افزایش می یابد. مبدل های PWM در کلیدزنی سخت عمل می کنند زیرا شکل موج ولتاژ کلید مربعی است و ترانزیستور در ولتاژ بالا روشن می شود. کلید قدرت S و دیود D1 ولتاژ DC ورودی VI را به یک موج مربعی در ورودی مدار  $RL-C-L$  تبدیل می کنند. به عبارت دیگر ولتاژ DC ورودی VI توسط شبکه کلیدزنی ترانزیستور - دیود بریده می شود. مدار  $RL-C-L$  به عنوان یک فیلتر پایین گذر مرتبه دوم عمل می کند و موج مربعی را به ولتاژ خروجی DC با ریبیل کم تبدیل می نماید. به دلیل اینکه ولتاژ متوسط سلف L برای حالت پایدار صفر است متوسط ولتاژ خروجی VO برابر با متوسط ولتاژ موج مربعی است. پهنای موج مربعی برابر با زمان بسته بودن کلید S است و می تواند توسط تغییر ضریب وظیفه «D» ولتاژ گیت MOSFET تغییر کند. بنابراین موج مربعی، یک شکل موج ولتاژ PWM است. مقدار متوسط شکل موج ولتاژ PWM برابر  $VO = D.VI$  می باشد که به ضریب وظیفه وابسته است و تقریباً مستقل از بار است (برای حالت CCM). در حالت تئوری ضریب وظیفه می تواند از صفر تا ۱۰۰٪ تغییر کند. این بدین معنی است که VO خروجی از ۰ تا VI تغییر می کند. بنابراین مدار Buck یک مبدل کاهنده است. در عمل ولتاژ DC ورودی VI در محدوده معینی تغییر می کند. در حالیکه ولتاژ خروجی VO باید در مقدار ثابتی نگه داشته شود اگر ولتاژ DC، VI افزایش یابد ضریب وظیفه آنقدر کاهش می یابد که حاصل  $VI.D$  که مقدار متوسط ولتاژ PWM است ثابت نگه داشته شود. از طرف دیگر اگر ولتاژ ورودی یعنی VI کاهش یابد ضریب وظیفه آنقدر افزایش می یابد که مقدار متوسط سیگنال PWM ثابت بماند. بنابراین مقدار انرژی ارسال شده از منبع ولتاژ ورودی VI به بار توسط تغییر کلید در ضریب وظیفه کنترل می شود. اگر ولتاژ خروجی VO و مقاومت بار RL (جریان بار IO) ثابت باشند؛ توان خروجی نیز ثابت می ماند. وقتی ولتاژ ورودی VI افزایش می یابد زمان بسته بودن کلید کاهش می یابد تا همان مقدار انرژی را انتقال دهد. محدوده عملی D معمولاً از ۵٪ تا ۹۵٪ است. ضریب وظیفه توسط یک مدار کنترل، کنترل می گردد. جریان سلف شامل یک جزء AC است که مستقل از جریان بار DC در CCM و جزء DC که برابر جریان بار DC «IO» می باشد. وقتی که جریان DC خروجی در سلف جریان می یابد تنها از نیمی از منحنی H-B هسته سلف استفاده می شود. بنابراین سلف L باید طوری طراحی شود که هسته اشباع نشود. برای اجتناب از اشباع هسته، هسته ای با فاصله هوایی و حجم به اندازه کافی بزرگ نیاز است.

### ۳-۲- فرضیات تحلیل مبدل Buck

تحلیل های مبدل PWM از نوع Buck در شکل (۵) با فرضیات زیر شروع می شود.

- MOSFET قدرت و دیود کلیدهای ایده ال هستند.
- ظرفیت خازنی خروجی ترانزیستور، ظرفیت خازنی دیود و اندوکتانس ها صفر هستند. بنابراین از تلفات کلیدزنی چشم پوشی می گردد.
- اجزای پسیو، خطی، تغییر ناپذیر با زمان و مستقل از فرکانس هستند.
- امپدانس خروجی منبع ولتاژ ورودی هم برای مولفه های DC و هم AC صفر است.
- مبدل در حالت پایدار کار می کند.
- دوره کلیدزنی  $f_s = 1/T$  خیلی کوچکتر از ثابت های زمانی اجزای راکتیو می باشد.

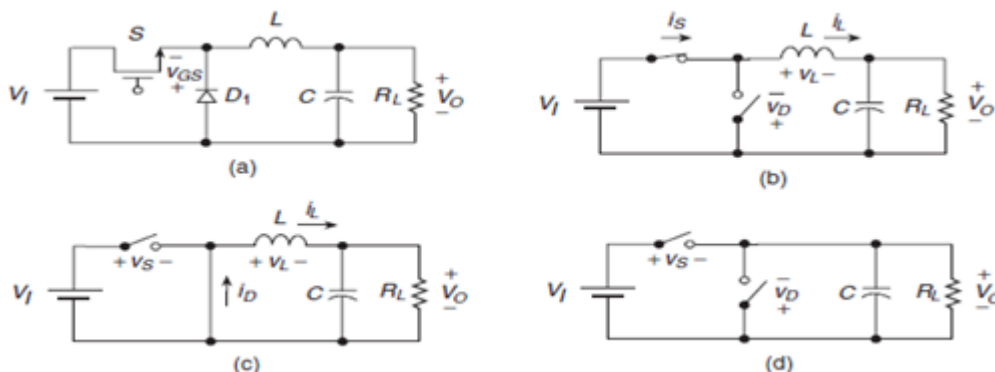




شکل (۴): شکل موج های ولتاژ و جریان ایده ال

### ۳-۳- تحلیل مبدل DC مبدل Buck به روش PWM برای حالت DCM

در این بررسی، ما به تحلیل مبدل DC-DC مبدل باک در حالت DCM (Discontinuous Conduction Mode) که با روش PWM کنترل می شود، می پردازیم. مبدل BUCK یک مبدل DC-DC متداول است که با کاهش ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی را تنظیم می کند. این مبدل از یک سلف، یک سوئیچ (ترانزیستور)، یک دیود و یک خازن تشکیل شده است. در حالت DCM، جریان سلف در طی هر چرخه سوئیچینگ به صفر می رسد. این حالت برای کاربردهایی مناسب است که نیاز به توان خروجی نسبتاً کم و کنترل دقیق ولتاژ خروجی دارند. برای تحلیل در حالت DCM، سه حالت را بررسی می کنیم: حالت سوئیچ روشن، حالت سوئیچ خاموش و دیود هدایت می کند، و حالت سوئیچ خاموش و دیود هر دو خاموش. با توجه به موازنه انرژی در هر حالت و حل معادلات دیفرانسیل مربوطه، معادلات طراحی مبدل در حالت DCM به دست می آید. مدار معادل مبدل Buck به روش PWM که در حالت هدایت گسسته جریان کار می کند در شکل (۵) نشان داده شده است:



شکل (۵): مدار معادل مبدل Buck به روش PWM

در نهایت، نتایج تحلیل مبدل BUCK در حالت DCM به صورت زیر خواهد بود:

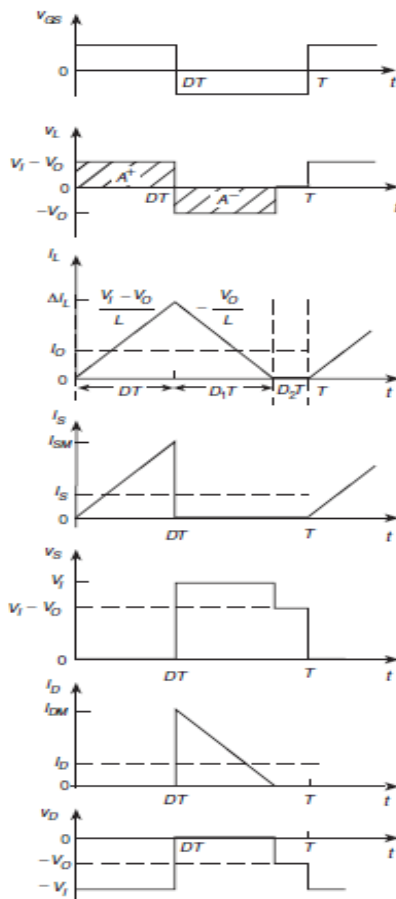
۱. ولتاژ خروجی متناسب با نسبت تغییرات سوئیچ (duty cycle) است.
۲. جریان سلف در حالت پایدار دارای مقدار متوسط و دامنه نوسان است.



۳. با افزایش بار، دامنه نوسان جریان سلف افزایش می یابد.

۴. برای داشتن حالت DCM، نسبت تغییرات سوئیچ باید از یک مقدار بحرانی کمتر باشد.

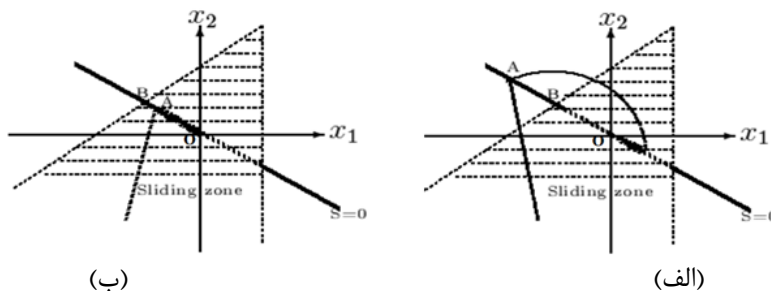
این تحلیل می تواند به طراحی و بهینه سازی مبدل BUCK در حالت DCM کمک کند. شکل موج های ولتاژ و جریان ایده آل در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل (۶): شکل موج های ولتاژ و جریان ایده آل در مبدل

#### ۴- کنترل فازی و مد لغزشی

انتخاب پارامترهای کنترلی تأثیر زیادی بر عملکرد سیستم حلقه بسته دارد، به خصوص زمانی که سیستم دارای تغییرات زیاد حول مقدار نامی اش باشد. پارامترهای کنترلی باید با دقت انتخاب شوند تا تضمین شود که دینامیک سیستم، سطح تغییر در بخش لغزشی را قطع می کند. در این روش از رفتار نامطلوبی که توسط یک فراجش پاسخ منعکس می شود جلوگیری می گردد (شکل ۷). همچنین، در شکل (۸) پیکر بندی کنترل کننده مد لغزشی نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

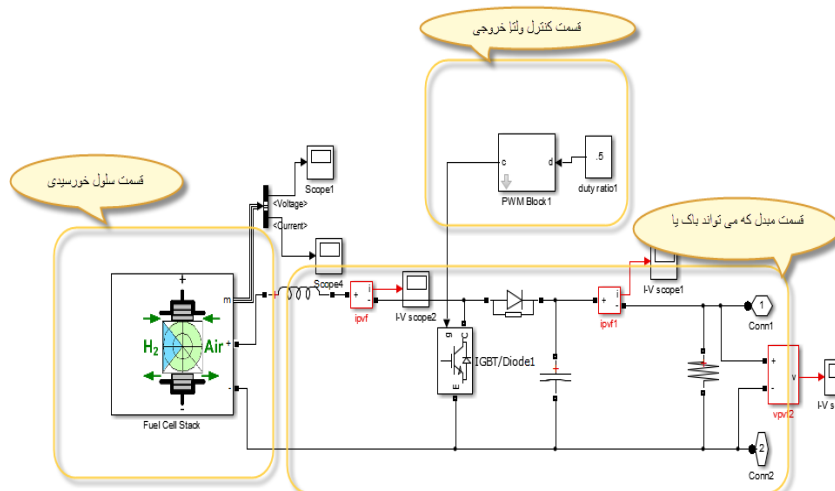
شکل (۷): پارامترهای کنترلی مد لغزشی، (الف) با فراجش و (ب) بدون فراجش.



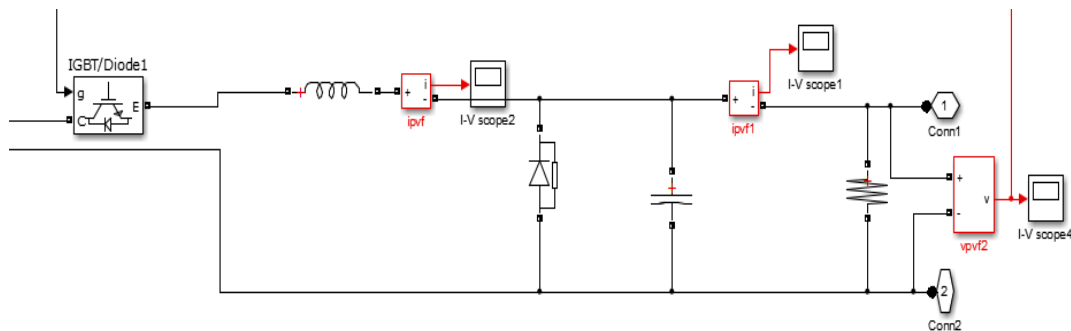
تحت این شرایط مشتق زمانی تابع لیاپانوف منفی می گردد و سیستم کنترلی به صورت مجانبی پایدار می گردد. بردار ورودی بخش SVM بعد از تبدیل اجزای ولتاژ روتور در قاب مرجع شار استاتور به قاب مرجع روتور به دست می آیند.

## ۵- شبیه سازی و تحلیل نتایج

در شکل (۹)، ساختار مبدل پیاده سازی شده نمایش داده شده است، که قسمت های مختلف آن را نشان می دهد. در یک رگولاتور باک، مقدار متوسط ولتاژ خروجی کمتر از ولتاژ ورودی است. نمودار مدار یک رگولاتور باک که از یک ماسفت قدرت به عنوان سوئیچ استفاده می کند در شکل (۱۰) ارائه شده است، که مشابه یک چاپر کاهش پله ای می باشد. عملکرد مدار را می توان به دو حالت تقسیم کرد: در حالت اول، هنگامی که ترانزیستور در  $t=0$  روشن می شود، جریان ورودی صعودی از سلف، فیلتر و مقاومت بار عبور می کند. در حالت دوم، هنگامی که ترانزیستور در لحظه  $t_2$  خاموش می شود، انرژی ذخیره شده در سلف باعث هدایت دیود هرزگرد می شود و جریان سلف به عبور از خازن، بار و دیود ادامه می دهد. جریان سلف تا زمان روشن شدن دوباره ترانزیستور در سیکل بعدی کاهش می یابد. مدارهای معادل برای این دو حالت در شکل (۱۰) نشان داده شده اند. شکل موج های ولتاژ و جریان برای حالت جریان پیوسته در سلف ارائه شده است. بسته به فرکانس کلیدزنی و اندوکتانس فیلتر، جریان سلف ممکن است ناپیوسته نیز باشد. رگولاتور باک ساده و بازده آن بیش از ۹۰٪ است و فقط به یک ترانزیستور نیاز دارد. در این رگولاتور، ولتاژ خروجی فقط یک قطبیت داشته و جریان خروجی یکسویه است. همچنین برای جلوگیری از اتصال کوتاه در مسیر دیود، به یک مدار محافظ نیاز است. این آرایش ساده و ابتدایی دارای نقاط ضعفی است. شکل (۹) ساختار مبدل باک را نشان می دهد.

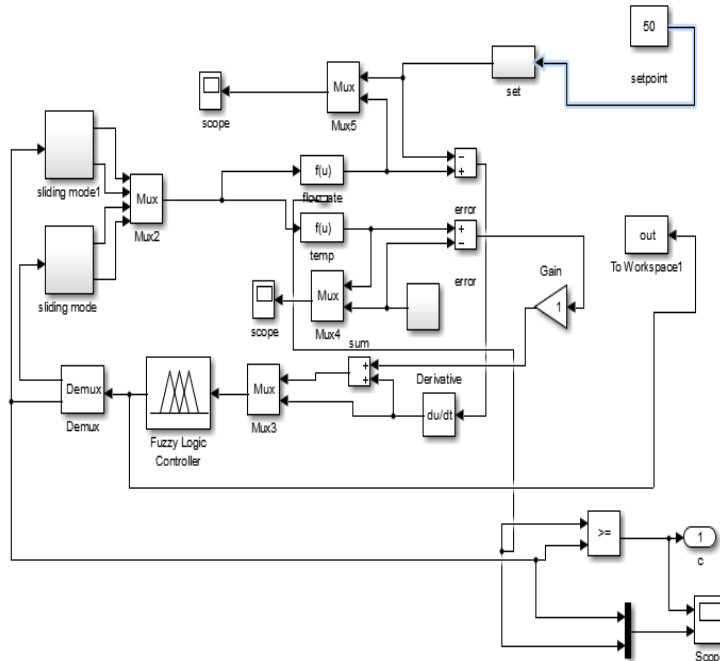


شکل (۹): ساختار سیستم سلول سوختی همراه با کنترل کننده مد لغزشی



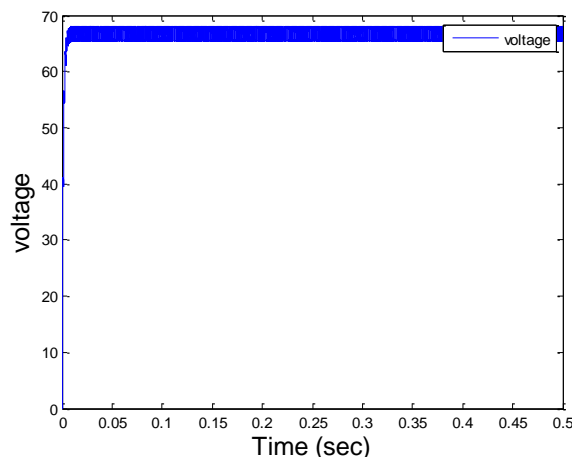
شکل (۱۰): مبدل باک پیاده سازی شده

شکل (۱۱)، ساختار فازی مورد استفاده به عنوان کنترلر ولتاژهای گیت را نمایش می دهد. پارامترهای شبیه سازی مبدل باک به صورت  $r_L=0.7\Omega$ ,  $r_d=0.7\Omega$ ,  $r_c=1.18\Omega$ ,  $r_1=0.2\Omega$ ,  $C=1450\mu F$ ,  $L=0.42mH$ ,  $R_L=118\Omega$ ,  $V_{dc}=50V$ ,  $d=0.5$  این سیستم بدین صورت است که ابتدا ساختار فازی بر اساس ورودی ها و قوانین موجود سیگنالی را تولید کرده و در نهایت وارد قسمت لغزشی می شود.

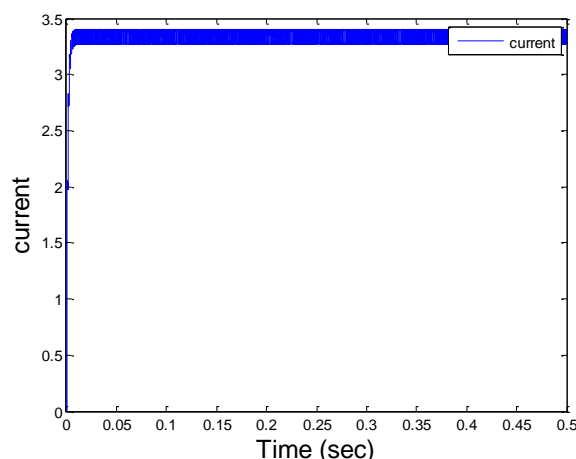


شکل (۱۱): ساختار فازی- لغزشی مورد استفاده

شکل موج های ولتاژ خروجی در شکل (۱۲) برای کنترل کننده فازی ترسیم شده اند. در این شکل، شکل موج ولتاژ بار با استفاده از کنترل کننده PWM را نشان می دهد. همانطور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، ولتاژ خروجی پس از چند صدم ثانیه به مقدار تقریباً ثابتی می رسد. این مقدار ثابت همچنان نوسان دارد که به دلیل ضعف عملکردی کنترل کننده است. همین رفتار در منحنی جریان در شکل (۱۳) نیز دیده می شود. این ساختار نسبت به ولتاژ رفتار گذرای بیشتری دارد که به دلیل ساختار مبدل باک است که در آن سلف در مسیر عبور جریان استفاده شده است. همچنین جریان بار در این ساختار در حالت ماندگار نیز دارای نوسان است.



شکل (۱۲): شکل موج ولتاژ به ازای بار مقاومتی ۲۰ اهمی با کنترل کننده PWM



شکل (۱۳): شکل موج جریان به ازای بار مقاومتی ۲۰ اهمی با کنترل کننده PWM

در جدول (۲)، مقایسه‌ای بین استفاده از کنترل کننده مد لغزشی و کنترل کننده PWM برای سیستم سلول سوختی ارائه شده است. در این جدول، پارامترهای THD، میزان نوسانات خروجی و زمان گذر به صورت عددی محاسبه و آورده شده است. همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، میزان بهبودی در استفاده از کنترل کننده فازی بسیار بالاست، به طوری که زمان گذر تقریباً ۲ برابر کاهش یافته و میزان رپیل خروجی نیز بهبود خوبی را نشان می‌دهد. همچنین، میزان نوسانات جریان نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

جدول (۲): نتایج شبیه سازی کنترلر مد لغزشی و PWM برای سیستم سلول سوختی

کنترلر	زمان گذرا (ثانیه)	خروجی رپیل (ولت)	جریان رپیل (آمپر)
فازی-لغزشی	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳
PWM	۰/۱۲	۰/۵	۰/۵

## ۵- نتیجه گیری

این پژوهش، کنترلر مد فازی لغزشی برای کنترل مبدل باک مورد استفاده قرار گرفته است تا ولتاژ خروجی پیل سوختی را به یک مقدار مشخص با کمترین نوسان برساند. کنترلر مد لغزشی یک روش کنترل غیرخطی است که مزایایی چون عدم حساسیت به پارامترها و دفع اغتشاشات دارد. نتایج شبیه سازی نشان داد که با ترکیب این روش با منطق فازی، عملکرد کنترل کننده بهبود یافته و مقاومت آن در برابر عدم قطعیت‌های مدل افزایش یافته است. همچنین، نتایج حاصل نشان داد که این ساختار کنترلی در مقایسه با کنترل کننده‌های PWM کارایی بالاتری دارد.

## منابع

- Chatrattanawet, N.; Hakhen, T.; Kheawhom, S.; Arpornwichanop, A. Control structure design and robust model predictive control for controlling a proton exchange membrane fuel cell. *J. Clean. Prod.* 2017, 148, 934–947.
- Wang, Y.X.; Yu, D.H.; Chen, S.A.; Kim, Y.B. Robust DC/DC converter control for polymer electrolyte membrane fuel cell application. *J. Power Sources* 2014, 261, 292–305.
- Valdez-Resendiz, J.; Rosas-Caro, V.S.J.; Maldonado, M.; Sierra, J.; Barbosa, R. Continuous input-current buck-boost DC-DC converter for PEM fuel cell applications. *Int. J. Hydrog. Energy* 2017, 42, 30389–30399.
- Afsharinejad, A.; Asemani, M.H.; Dehghani, M.; Abolpour, R.; Vafamand, N. Optimal gain-scheduling control of proton exchange membrane fuel cell: An LMI approach. *IET Renew. Power Gener.* 2022, 16, 459–469.
- Bayram, M.B.; Sefa, I.; Balci, S. A static exciter with interleaved buck converter for synchronous generators. *Int. J. Hydrog. Energy* 2017, 42, 17760–17770.
- Wang, Y.X.; Ou, K.; Kim, Y.B. Power source protection method for hybrid polymer electrolyte membrane fuel cell/lithium-ion battery system. *Renew. Energy* 2017, 111, 381–391.

- Lian, K.Y.; Liou, J.J.; Huang, C.Y. LMI-based integral fuzzy control of DC-DC converters. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2006, 14, 71–80.
- Sumsurooah, S.; Odavic, M.; Bozhko, S.; Boroyevich, D. Robust stability analysis of a DC/DC buck converter under multiple parametric uncertainties. *IEEE Trans. Power Electron.* 2017, 33, 5426–5441.
- Olalla, C.; Leyva, R.; El Aroudi, A.; Queinnec, I. Robust LQR control for PWM converters: An LMI approach. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2009, 56, 2548–2558.
- Wang, J.; Li, S.; Yang, J.; Wu, B.; Li, Q. Extended state observer-based sliding mode control for PWM-based DC–DC buck power converter systems with mismatched disturbances. *IET Control Theory Appl.* 2015, 9, 579–586.
- Ahmeid, M.; Armstrong, M.; Gadoue, S.; Gadoue, S.; Algreer, M.; Missailidis, P. Real-time parameter estimation of DC–DC converters using a self-tuned Kalman filter. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 32, 5666–5674.
- Ding, S.; Zheng, W.-X.; Sun, J.; Wang, J. Second-order sliding-mode controller design and its implementation for buck converters. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2017, 14, 1990–2000.
- Hernández-Méndez, A.; Linares-Flores, J.; Sira-Ramírez, H.; Guerrero-Castellanos, J.F.; Mino-Aguilar, G. A backstepping approach to decentralized active disturbance rejection control of interacting boost converters. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2017, 53, 4063–4072.
- Salimi, M.; Soltani, J.; Markadeh, G.A.; Abjadi, N.R. Indirect output voltage regulation of DC–DC buck/boost converter operating in continuous and discontinuous conduction modes using adaptive backstepping approach. *IET Power Electron.* 2013, 6, 732–741.
- Zuniga-Ventura, Y.A.; Langarica-Cordoba, D.; Leyva-Ramos, J.; Diaz-Saldierna, L.H.; Ramírez-Rivera, V.M. Adaptive backstepping control for a fuel cell/boost converter system. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2018, 6, 686–695.
- Nizami, T.K.; Chakravarty, A.; Mahanta, C. Analysis and experimental investigation into a finite time current observer based adaptive backstepping control of buck converters. *J. Frankl. Inst.* 2018, 355, 4996–5017.
- Giaouris, D.; Stergiopoulos, F.; Ziogou, C.; Banerjee, S.; Zahawi, B.; Pickert, V.; Voutetakis, S.; Papadopoulou, S. Nonlinear stability analysis and a new design methodology for a PEM fuel cell fed DC–DC boost converter. *Int. J. Hydrog. Energy* 2012, 37, 18205–18215.

## Dispersed Production System Control Based on Proton-Exchange Membrane Fuel Cells with the approach of improving output voltage quality

Sarem Hajati Seimani<sup>1</sup>, Faculty of Electrical Engineering, Payam Golpayegan Institute of Higher Education, Isfahan, Iran

Seyed Moosa Ayati, Faculty of Mechanical Engineering, Tehran University Technical Faculties Campus, Tehran, Iran

### Abstract

Fuel cell systems have several advantages over other sources of energy production and there is a promising perspective for them. However, to achieve the optimal performance of these systems, it is necessary to provide a suitable strategy for their control. In this paper, a dynamic model for a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is presented and its dynamic behavior is investigated. The presented model includes a fuel cell, a buck converter and a power inverter, which is simulated in the MATLAB/Simulink environment. The study of fuel cell dynamics shows that the output voltage of the fuel cell is strongly affected by changes in the output load. Therefore, to use a fuel cell in energy production, it seems necessary to control the output voltage. In this article, PID and phase controllers are proposed to control the output voltage of the fuel cell and their performance has been evaluated. The simulation results show that the fuzzy controller has a better performance in improving the output voltage.

**Keywords:** Fuel Cell, Phase Control, BUCK Converter, PEMFC

---

<sup>1</sup> Corresponding Author