

# Robust Observer Based Adaptive Control for Stability Enhancement of a DC-DC Buck Converter Feding a CPL in DC Microgrid

Amirreza Younesi<sup>1</sup>, Jafar Adabi<sup>2</sup>, Seyyed Yousef Mousazadeh Mousavi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Faculty of Electrical and Computer Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran-Iran [amirrezapars@stu.nit.ac.ir](mailto:amirrezapars@stu.nit.ac.ir)

<sup>2</sup> Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran  
[j.adabi@nit.ac.ir](mailto:j.adabi@nit.ac.ir)

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Mazandaran, Iran  
[s.y.mousazadeh@umz.ac.ir](mailto:s.y.mousazadeh@umz.ac.ir)

## Abstract:

Nowadays, due to the widespread use of DC energy sources, DC microgrids (DCMG) have been attracted more interest. DCMG in the presence of constant power loads (CPLs) is prone to challenges such as instability. This paper introduces a nonlinear control strategy for a DC-DC buck converter feeding a CPL in a DCMG. This strategy includes adaptive controller using backstepping controller and sliding mode controller along with Extended Nonlinear Disturbance Observer (ENDO). This adaptive controller is able to overcome CPL problems; furthermore, the ENDO improves the robustness and dynamic of the system by estimating system disturbances more accurately than the conventional NDO. In order to verify the performance of the proposed controller, simulation in MATLAB/Simulink software and also experimental test have been done.

**Keywords:** Backstepping Sliding Mode Controller, Buck converter, Constant power load, DC Microgrid, Extended nonlinear disturbance observer.

**Article Type:** Research

**Received:** 11. 05. 2024

**Revised:** 20. 07. 2024

**Accepted:** 11. 08. 2024

**Corresponding author:** Seyyed Yousef Mousazadeh Mousavi

**Corresponding author's address:** Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran



## 1. Motivation of the work

With the expansion of the use of DC energy sources and the penetration of DC loads in various systems, DC microgrids have been proposed as an attractive alternative to AC microgrids. New generations of loads, such as electric vehicles and constant power loads (CPL), exist in microgrid structures. These types of loads can cause a negative gain impedance that may push the converter towards a non-dissipating system. This issue can lead to the unstable performance of the microgrid, especially when there are uncertainties or disturbances. By using non-linear control methods, it is possible to improve the performance and stability of DC microgrids. The adaptive backstepping method is recognized as a powerful approach for designing nonlinear controllers in complex systems. The use of backstepping sliding mode control (BSMC) is known as an efficient method to deal with disturbances and potential parameter changes. This method, in addition to ensuring large-signal stability, also enables the step-by-step design of complex controllers. According to the reviews from various sources, the design of the BSMC controller for the buck converter is not presented.

## 2. Contributions

In this paper, the adaptive method, which includes the hybrid controller of backstepping and sliding mode, is used to stabilize the buck converter in the presence of CPL. Also, to eliminate the instability caused by incoherent disturbances, the Extended Nonlinear Disturbance Observer (ENDO) has been used to estimate disturbances, making it a faster disturbance observer than the Nonlinear Disturbance Observer (NDO). In general, the innovation of this article can be summarized as follows:

- 1) Using a combination of backstepping and sliding mode controllers to control the buck converter in order to exploit the advantages of both methods.
- 2) Use of ENDO to monitor disturbances with higher recovery speed and reduced overshoot compared to NDO..

## 3. Procedures

The structure of the studied DC microgrid consist of two converters. The both of source and load converters are considered buck converters. This circuit consists of three parts: a source, a voltage regulator converter and a load. It is worth mentioning that in this article, in order to evaluate the performance of the proposed controller, the worst case in terms of stability, i.e., the presence of only CPL, is considered a load. Because the presence of resistance causes damping and increases stability. For the effectiveness of the controller designed in this article, it is evaluated under different operating modes, considering power changes, input voltage changes, and reference voltage changes according to microgrid specifications and different scenarios for each of these changes.

## 4. Findings

The performance of the designed controller is presented using the three case studies mentioned below:

- 1) Changes in CPL power.
- 2) Changes in input voltage.
- 3) Changes in the reference voltage.

Also, the performance of the proposed nonlinear controller is compared with the BSMC and BSMC+NDO methods to show its superiority. These results show that, compared to BSMC and BSMC+NDO, the proposed controller can provide faster dynamic responses with less overshoot. Also, a table consisting of the percentage of overshoot or undershoot and the settling time of the DC bus voltage due to the studied changes and at the time of the highest overshoot or undershoot caused by the changes is given in this paper.

Usually, time and error are considered together as important factors. The performance evaluation of the proposed controller is presented in Table 3 of this paper. This table is based on three indicators, which are: integral square error (ISE), integral time square error (ITSE) and integral time absolute error (ITAE). According to this table, the proposed controller provides a better response than other methods.

## 5. Conclusion

In this paper, a controller for a DC-DC buck converter with CPL is introduced that is resistant to CPL instability. This proposed controller uses the combination of two controllers to use the advantages of each to cover the disadvantages of each other. By using this, the adaptive controller ensures the stability of the system in the presence of disturbances and provides much faster performance with less overshoot than the PI method. Also, the ENDO disturbance monitor is used to respond to the uncertain effects of CPL and disturbances. Considering the importance of solving CPL instability in DC microgrids and increasing attention to this type of network in the industry, controlling the stability of these systems is vital and necessary. The controller proposed in this article can be implemented on other DC-DC converters and has shown good performance.

## کنترل مقاوم تطبیقی مبتنی بر ناظر با هدف افزایش پایداری مبدل DC-DC باک با حضور بار توان ثابت در ریزشبه DC

امیررضا یونسی<sup>۱</sup>، جعفر ادبی<sup>۲</sup>، سید یوسف موسی زاده موسوی<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- مازندران- ایران

[amirrezapars@stu.nit.ac.ir](mailto:amirrezapars@stu.nit.ac.ir)

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- مازندران- ایران

[j.adabi@nit.ac.ir](mailto:j.adabi@nit.ac.ir)

۳- استادیار- دانشکده مهندسی و فناوری - دانشگاه مازندران، بابلسر- مازندران- ایران

[s.y.mousazadeh@umz.ac.ir](mailto:s.y.mousazadeh@umz.ac.ir)

**چکیده:** امروزه، به دلیل استفاده گسترده از منابع انرژی DC، ریزشبه‌های DC مورد توجه روزافزون قرار گرفته‌اند. ریزشبه‌های DC در حضور بار توان ثابت<sup>۱</sup> (CPL) با چالش‌های اساسی نظیر ناپایداری روبه‌رو هستند. در همین راستا، این مقاله یک روش کنترل غیرخطی را برای مبدل DC-DC باک در حضور CPL در یک ریزشبه DC ارائه می‌دهد. این روش پیشنهادی، شامل کنترل‌کننده تطبیقی با استفاده از کنترل‌کننده پس‌گام<sup>۲</sup> (BSC) و کنترل‌کننده مد لغزشی<sup>۳</sup> (SMC) به همراه ناظر اغتشاش غیرخطی گسترده<sup>۴</sup> (ENDO) است. این کنترل‌کننده تطبیقی قادر به حفظ پایداری در برابر تغییرات CPL و عوامل نامطلوب دینامیکی است. همچنین، ناظر اغتشاش غیرخطی گسترده با برآورد دقیق‌تر اغتشاشات سیستم نسبت به ناظر اغتشاش غیرخطی<sup>۵</sup> (NDO)، پایداری و سرعت پاسخ دینامیکی سیستم را بهبود می‌بخشد. جهت ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink و همچنین آزمایش در ابعاد تست آزمایشگاهی صورت گرفته است.

**کلمات کلیدی:** بار توان ثابت؛ ریزشبه DC؛ کنترل‌کننده تطبیقی؛ ناظر اغتشاش غیرخطی گسترده؛ مبدل باک

### نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱

نام نویسنده مسئول: سید یوسف موسی زاده موسوی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - مازندران - بابلسر - دانشگاه مازندران - پردیس دانشگاه مازندران - دانشکده مهندسی و فناوری

## ۱- مقدمه

مشکلات زیست محیطی و محدودیت در تامین سوخت های فسیلی، منجر به رشد و توسعه ریزشبه ها در سیستم های قدرت مدرن شده است. پیشرفت در فناوری های انرژی های تجدیدپذیر و حمایت دولت ها از انرژی تجدیدپذیر، پژوهشگران را به توسعه و گسترش تولید پراکنده<sup>۶</sup> (DG) سوق داده اند [۲۱]. با گسترش استفاده از منابع انرژی DC و نفوذ بارهای DC در سیستم های مختلف، ریزشبه های DC به عنوان یک جایگزین جذاب برای ریزشبه های AC مطرح شده اند. این ریزشبه ها به دلیل ویژگی هایی مانند انعطاف پذیری بالا، کاهش مراحل تبدیل انرژی، سهولت کنترل و عدم وجود مسائل مربوط به همگام سازی و شارش توان راکتیو، توجه بسیاری را به خود جلب کرده اند. ریزشبه های DC امکان ادغام واحدهای تولید پراکنده، سیستم های ذخیره ساز انرژی<sup>۷</sup> (ESS) و بارهای DC را به صورت یکپارچه فراهم می کنند [۳، ۴ و ۵].

بارهای نسل جدید مانند وسایل نقلیه الکتریکی و بارهای توان ثابت (CPL) در ساختارهای ریزشبه وجود دارند. این نوع بارها می توانند باعث افزایش امپدانس افزایشی منفی شوند که ممکن است مبدل را به سمت یک سیستم غیر اتلاف انرژی سوق دهند. این موضوع به ویژه در مواقعی که عدم قطعیت ها یا اغتشاشات وجود داشته باشند، می تواند منجر به عملکرد ناپایدار ریزشبه شوند [۶، ۷ و ۸]. با این حال، با استفاده از روش های کنترل غیرخطی، می توان به بهبود در عملکرد و پایداری ریزشبه های DC کمک نمود.

مطالعات منابع و مقالات نشان می دهد که روش ها به دو نوع فعال و غیر فعال تقسیم می شوند. یکی از راه حل های کنترل کننده به روش غیر فعال، اضافه کردن عناصر مدار غیرفعال به مبدل منبع یا فیلتر LC می باشد، اما این روش ممکن است منجر به افزایش تلفات انرژی، افزایش هزینه و اندازه سیستم شود. در روش فعال می توان از کنترل کننده های خطی و غیر خطی استفاده کرد که می تواند به حل مشکل ناپایداری ناشی از CPL در ریزشبه ها کمک کند [۹ و ۱۰]. در روش های غیرخطی کنترل، از انواع مختلف کنترل کننده ها برای حل مشکلات ناپایداری استفاده می شود. این کنترل کننده ها شامل کنترل پس گام، کنترل مد لغزشی، کنترل مبتنی بر انفعال، کنترل تطبیقی، کنترل مدل پیش بین، کنترل هم افزایی و کنترل  $\infty H$  می شوند [۴ و ۱۱].

کنترل کننده BSC یکی از مؤثرترین ابزارهای طراحی کنترل غیرخطی برای حل مسائل پایداری است. از مزایای این کنترل کننده می توان به دینامیک سریع و تضمین پایداری سیگنال بزرگ، اشاره کرد [۴ و ۹]. در [۱۲]، از یک کنترل کننده غیرخطی شامل BSC و NDO برای مبدل بوس<sup>۸</sup> DC-DC در حضور بار CPL ارائه شده است. از معایب این روش کنترلی می توان به حساسیت به پارامترها و اغتشاشات ناهماهنگ اشاره کرد که نیازمند به تکنیک های انطباقی است. عدم قطعیت ها و اغتشاشات ناهماهنگ می توانند تأثیرات مخربی

بر عملکرد سیستم کنترلی داشته باشند و ناشی از ضعف در مدل سازی سیستم هستند. با این حال، بسیاری از این کنترل کننده ها با این فرض طراحی می شوند که مدل غیرخطی سیستم دقیق است درحالی که عدم قطعیت ها یا اغتشاشات ناهماهنگ در نظر گرفته نمی شوند [۱۳].

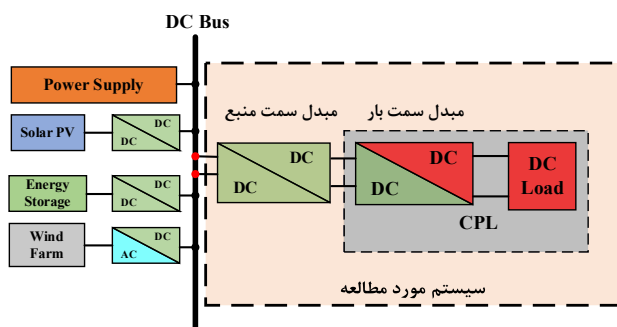
در [۱۴]، یک فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی با کنترل مبتنی بر انفعال برای مبدل باک در ریزشبه DC در حضور CPL معرفی شده است. اما به دلیل بار محاسباتی بالای این کنترل کننده، اجرای عملی آن ممکن است محدود باشد. در صورت نادرست بودن مدل ریاضی سیستم، استفاده از روش های کنترل کننده مقاوم ضروری است.

یکی از این کنترل کننده ها، کنترل کننده مد لغزشی می باشد. [۱۵ و ۱۶] در [۱۷]، کنترل مد لغزشی مقاوم مدولاسیون پهنای باند، پایداری سیستم ها را با استفاده از یک سطح لغزش جدید تضمین می کند. اگرچه اثرات نامطلوب و عدم قطعیت پارامترهای سیستم با کنترل مد لغزشی، محدود و کنترل می شوند، اما ضرایب مد لغزشی ثابت، باعث ایجاد نوسانات شده و دچار چترینگ<sup>۹</sup> می شود. در [۱۸]، یک کنترل کننده مد لغزشی برای کنترل مبدل باک در حضور CPL با فرکانس کلیدزنی ثابت پیشنهاد شده است. با اعمال تغییرات، عملکرد کنترل کننده تحت شرایط بهره برداری مختلفی ارزیابی شده است. هرچند پایداری سیستم در شرایط مختلف به خوبی توسط این کنترل کننده تضمین شده است؛ با این وجود، نیاز به اندازه گیری متغیرهای مختلف و نصب سنسورهای بیشتر، باعث محدودیت در کاربردهای آن می شود.

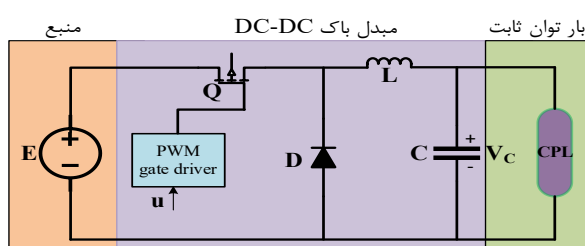
در واقع، روش پس گام تطبیقی به عنوان یک رویکرد قدرتمند برای طراحی کنترل کننده های غیرخطی در سیستم های پیچیده شناخته شده است. این روش از تکنیک های تطبیقی برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده بر اساس خروجی سیستم استفاده می کند تا عملکرد بهینه و پایداری سیستم را تضمین کند. همچنین، استفاده از تکنیک ENDO می تواند به طراحی کنترل کننده های غیرخطی کمک کند [۱۹]. استفاده از کنترل تطبیقی پس گام-مد لغزشی<sup>۱۰</sup> (BSMC) برای مقابله با اغتشاشات و تغییرات بالقوه پارامترها، به عنوان یک روش کارآمد شناخته شده است. این روش، علاوه بر اینکه پایداری سیگنال بزرگ را تضمین می کند، امکان طراحی گام به گام کنترل کننده های پیچیده را نیز فراهم می کند. در [۲۰ و ۲۱]، از ترکیب روش های خطی سازی بازخورد دقیق<sup>۱۱</sup> (EFL) و BSMC برای کنترل مبدل بوس<sup>۸</sup> با بار CPL و مقاومت در ریزشبه DC استفاده شده است. بنا به بررسی های انجام شده از منابع مختلف، طراحی کنترل کننده BSMC برای مبدل باک ارائه نشده است.

در این مقاله، از روش تطبیقی که شامل کنترل کننده ترکیبی پس گام و مد لغزشی است، برای پایداری سازی مبدل باک در حضور CPL استفاده شده است. همچنین برای از بین بردن ناپایداری ناشی از اغتشاشات ناهماهنگ، از ناظر اغتشاش ENDO جهت تخمین

در این رابطه،  $E$  ولتاژ ورودی و  $u$  نسبت وظیفه<sup>۱۲</sup> را نشان می‌دهند. هدف تنظیم ولتاژ خروجی  $V_C$  مطابق مرجع آن  $V_{Cref}$  است.  $I_L$  جریان کشیده شده توسط سلف است.



شکل (۱): ریزشبه DC توزیع شده با CPL



شکل (۲): سیستم توزیع DC آباشاری ساده شده با مبدل باک

### ۳- طراحی کنترل کننده

#### ۳-۱- تبدیل مختصات

متغیرهای حالت  $X_1$  و  $X_2$  در سیستم به صورت روابط (۳) و (۴) می‌باشد:

$$X_1 = V_C \quad (3)$$

$$X_2 = \frac{I_L}{C} \quad (4)$$

سپس با استفاده از تعاریف، مدل دینامیکی مبدل باک سیستم به صورت (۵) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 + d_1 \\ \dot{X}_2 &= w + d_2 \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن،  $d_1$  و  $d_2$  به ترتیب به عنوان اغتشاش ناهمبند و همبند تعریف می‌شوند.  $w$  به عنوان متغیر کمکی در (۶) تعریف می‌شود، همچنین اغتشاش  $d_1$  و  $d_2$  به صورت روابط (۷) و (۸) در نظر گرفته می‌شوند:

$$w = \frac{-1}{LC} X_1 + \frac{E}{LC} u \quad (6)$$

$$d_1 = -I_{CPL} + \frac{I_L}{C_0} - \frac{I_L}{C} \quad (7)$$

$$d_2 = -\frac{V_C}{L_0 C} + \frac{V_C}{LC} + \frac{Eu}{L_0 C} - \frac{Eu}{LC} \quad (8)$$

اغتشاشات، از یک ناظر اغتشاش سریع تر نسبت به NDO استفاده شده است. به طور کلی، نوآوری این مقاله به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- استفاده از ترکیب کنترل کننده‌های پس گام و مد لغزشی برای کنترل مبدل باک به منظور بهره‌برداری از مزایای هر دو روش

- استفاده از ENDO برای ناظر اغتشاشات با سرعت بازبایی بیشتر و کاهش فراجش نسبت به NDO.

به طور خلاصه بخش‌بندی مقاله به صورت زیر است: در بخش ۲، مدل سازی سیستم و بیان مسئله ارائه می‌شود. طراحی کنترل کننده در بخش ۳ تشریح خواهد شد. نتایج شبیه سازی و تست آزمایشگاهی در بخش ۴ و ۵ ارائه می‌شود. بخش ۶ هم به نتیجه گیری پرداخته می‌شود.

### ۲- مدل سازی سیستم و بیان مسئله

شکل ۱ شمای کلی ریزشبه DC را در حضور بار توان ثابت نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود و سیستم مورد مطالعه مشخص است، مبدل اصلی (مبدل سمت منبع)، ولتاژ DC ریزشبه را تنظیم می‌نماید. در این مقاله، سیستم متشکل از بار CPL (شامل مبدل و بار خطی تغذیه شونده از آن) و مبدل اصلی بخشی از یک ریزشبه است. مبدل سمت بار به عنوان یک بار توان ثابت (CPL) عمل می‌کند که توان ثابتی را از باس DC دریافت می‌کند. در این حالت، مشخصه ولتاژ - جریان CPL را می‌توان به صورت (۱) نوشت:

$$I_{CPL} = \frac{P_{CPL}}{V_C} \quad (1)$$

که در آن،  $I_{CPL}$  جریان کشیده شده توسط CPL است؛  $P_{CPL}$  توان حالت پایدار مصرف شده توسط CPL و  $V_C$  ولتاژ در باس DC را نشان می‌دهند. جزئیات بیشتر از ساختار ریزشبه DC مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است، که در آن مبدل سمت منبع و بار، به صورت مبدل باک در نظر گرفته شده‌اند. این مدار از سه بخش منبع، مبدل تنظیم کننده ولتاژ و بار تشکیل شده است: شایان ذکر است که بار در این مقاله، به منظور ارزیابی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، بدترین حالت از لحاظ پایداری یعنی حضور تنها CPL به عنوان بار در نظر گرفته شده‌است، زیرا وجود مقاومت، باعث ایجاد میرایی شده و پایداری را افزایش می‌شود.

مطابق با شکل ۲، عناصر اصلی یک مبدل باک شامل یک دیود (D)، یک سلف (L)، یک خازن (C) و یک کلید الکترونیک قدرت (Q) است. مدل مدار متوسط مبدل باک در تحلیل سیگنال بزرگ را می‌توان به صورت (۲) ارائه کرد:

$$\begin{aligned} L \frac{dI_L}{dt} &= uE - V_C \\ C \frac{dV_C}{dt} &= I_L - I_{CPL} \end{aligned} \quad (2)$$

مقدار مرجع  $X_2$  به دست می‌آید و در مرحله نهایی از SMC استفاده می‌شود.

**مرحله اول:** در این مرحله، متغیرهای خطای جدید  $e_1$  و  $e_2$  به صورت (۱۳) تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} e_1 &= X_1 - X_{1ref} \\ e_2 &= X_2 - X_{2ref} \end{aligned} \quad (13)$$

هدف از بین بردن خطای بین  $X_1$  و  $X_{1ref}$  است. با مشتق گرفتن از سطر اول (۱۳)، رابطه (۱۴) حاصل خواهد شد.

$$\dot{e}_1 = \dot{e}_2 + \dot{X}_{2ref} + \dot{d}_1 - \dot{X}_{1ref} \quad (14)$$

انتخاب تابع لیاپانوف به صورت (۱۵) صورت می‌گیرد:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} d_1^2 \quad (15)$$

در این رابطه،  $\dot{d}_1 = d_1 - \dot{d}_1$  با مشتق گرفتن از (۱۵)، رابطه (۱۶) حاصل می‌شود:

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (\dot{e}_2 + \dot{X}_{2ref} + \dot{d}_1 - \dot{X}_{1ref}) \quad (16)$$

با انتخاب  $X_{2ref}$  داریم:

$$X_{2ref} = -K_1 e_1 - \dot{d}_1 + \dot{X}_{1ref}, K_1 > 0 \quad (17)$$

در این رابطه،  $K_1$  یک بهره مثبت می‌باشد. با جاگذاری (۱۷) در (۱۶)، رابطه (۱۸) حاصل می‌شود:

$$\dot{V}_1 = -K_1 e_1^2 + e_1 \dot{e}_2 + e_1 \dot{d}_1 + \dot{d}_1 \dot{d}_1 - m_{11} d_1^2 \quad (18)$$

از (۱۸)، قابل مشاهده است که سیستم شرایط قطعی منفی لیاپانوف را برآورده نمی‌کند و به مرحله بعدی می‌رویم. باین حال، از آنجایی که قانون کنترل واقعی هنوز مشخص نشده است، مرحله دوم برای اطمینان از پایداری سیستم ضروری است.

### ۳-۴- طراحی کنترل کننده تنظیم خروجی

**مرحله دوم:** با مشتق گرفتن از سطر دوم (۱۳)، رابطه (۱۹) حاصل خواهد شد.

$$\dot{e}_2 = \dot{X}_2 - \dot{X}_{2ref} \quad (19)$$

اکنون با انتخاب سطح لغزشی مناسب، فاز لغزش انجام می‌شود. استفاده از دینامیک خطای یک روش رایج برای تعریف سطح لغزش است که در (۲۰) نشان داده شده است.

$$S = e_2 \quad (20)$$

برای دستیابی به این هدف کنترلی، در این مقاله، قانون SMC ارائه می‌شود که به صورت (۲۱) بیان می‌شود:

$$\dot{S} = -a_1 \operatorname{sgn}(S) - a_2 S \quad (21)$$

در روابط فوق،  $L$  و  $C$  به عنوان مقدار نامی سلف و خازن در نظر گرفته شده‌اند. همچنین پارامترهای  $L_0$ ،  $\Delta L$ ،  $C_0$  و  $\Delta C$  به صورت زیر هستند:

$$C_0 = C + \Delta C, \Delta C = \pm 20\% C, L_0 = L + \Delta L, \Delta L = \pm 20\% L$$

. با بازنویسی (۶)، می‌توان  $u$  را به صورت (۹) بدست آورد:

$$u = \frac{LCw}{E} + \frac{X_1}{E} \quad (9)$$

### ۳-۲- طراحی ناظر اغتشاش

همانطور که پیشتر بیان شده است، برای تخمین اغتشاشات، در این مقاله از ENDO استفاده می‌شود. با توجه به (۵)،  $d_1$  و  $d_2$  مقادیر اغتشاش مشاهده شده توسط ENDO به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) طراحی شده اند:

$$\begin{cases} d_1 = g_{11} + m_{11} X_1 \\ \dot{g}_{11} = -m_{11} (X_2 + d_1) + \dot{d}_1 \\ \dot{d}_1 = g_{12} + m_{12} X_1 \\ \dot{g}_{12} = -m_{12} (X_2 + d_1) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} d_2 = g_{21} + m_{21} X_2 \\ \dot{g}_{21} = -m_{21} (w + d_2) + \dot{d}_2 \\ \dot{d}_2 = g_{22} + m_{22} X_2 \\ \dot{g}_{22} = -m_{22} (w + d_2) \end{cases} \quad (11)$$

در روابط فوق،  $g$  متغیرهای کمکی هستند و  $m$  ضرایب مثبت طراحی ناظر اغتشاش هستند.

### ۳-۳- تولید مرجع

هدف کنترلی در نظر گرفته شده در این مقاله تنظیم ولتاژ خروجی مبدل باک، یعنی  $V_C$ ، به مقدار مرجع یعنی  $V_{Cref}$  با تنظیم  $u$  است. از طریق نگاشت‌های غیرخطی، این هدف به طراحی یک قانون کنترل مجازی  $w$  تبدیل می‌شود تا  $X_1$  را به مقدار مرجع  $X_{1ref}$  که به صورت (۱۲) تعریف می‌شود، تنظیم کند.

$$X_{1ref} = V_{Cref} \quad (12)$$

هدف اصلی، ردیابی مقادیر موردنظر  $X_1$  و  $X_2$  است که تضمین می‌کند ولتاژ باس DC تحت تأثیر اغتشاشات به طور دقیق ردیابی می‌شود. در ادامه، روش طراحی کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی به تفصیل ارائه خواهد شد. مراحل اولیه از طریق BSC انجام می‌شود و

$$\begin{cases} k_1 \bar{d}_1 + d_2 < k_1 \bar{d}_1 + \bar{d}_2 \\ k_1 \bar{d}_1 + \bar{d}_2 = \Omega \end{cases} \quad (28)$$

همچنین تابع فرضی  $\theta$  به صورت رابطه (۲۹) تعریف می‌شود:

$$-a_1 \operatorname{sgn}(S) - a_2 S = \theta \quad (29)$$

با توجه به [۲۱]، رابطه (۳۰) حاصل می‌شود:

$$\dot{V}_2 < -k_1 e_1^2 + \frac{1}{2} d_1^2 + \frac{1}{2} \dot{d}_1^2 - (m_{11} - 1) d_1^2 - (m_{21} - \frac{1}{2}) d_2^2 - (\theta - \Omega) |S| \quad (30)$$

حال با انتخاب مناسب ضرایب مؤثر، طبق تعریف زیر داریم:

$$\begin{cases} m_{11} > 2.5 \\ m_{21} > 2 \\ k_1 > \frac{1}{2} \\ a_1 > 0 \\ a_2 > 0 \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} \|d_1\| < \|\dot{d}_1\| \\ \|d_2\| < \|\dot{d}_2\| \end{cases} \quad (32)$$

با ترکیب روابط (۳۰)، (۳۱) و (۳۲) داریم:

$$\dot{V}_2 < -k_1 e_1^2 - d_1^2 - d_2^2 - (\theta - \Omega) |S| \quad (33)$$

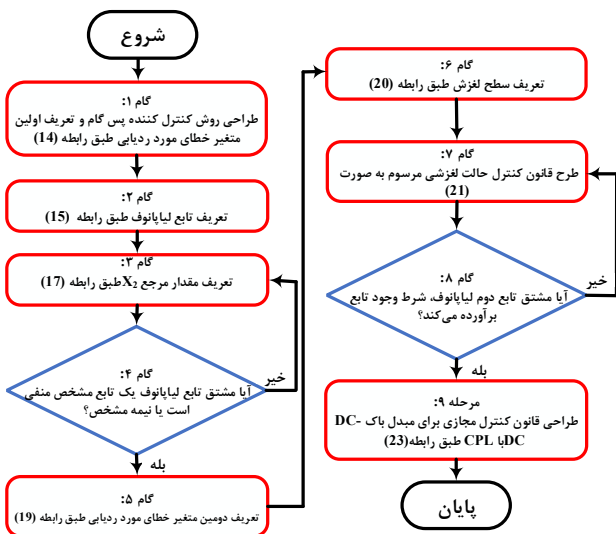
حال، با انتخاب شرایط مناسب زیر:

$$\theta \geq \Omega \quad (34)$$

در نهایت، تأیید اینکه مشتق تابع لیاپانوف منفی است، یعنی

$$\dot{V}_2 \leq 0 \text{ حاصل می‌شود.}$$

همچنین فلوچارت ساختار کنترل کننده پیشنهادی در شکل ۴ آورده شده است.



شکل (۴): فلوچارت ساختار کنترل کننده پیشنهادی

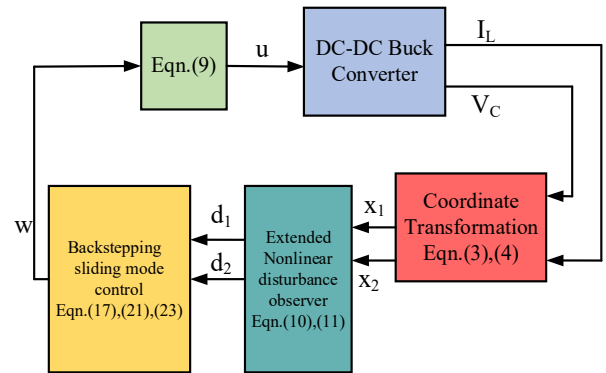
در این رابطه،  $a_1$  و  $a_2$  بهره ثابت مثبت هستند. حال با مشتق گرفتن از (۲۰) داریم:

$$\dot{SS} = S[(K_1)(e_2 - K_1 e_1) + w + d_2 + \dot{d}_1 - \ddot{X}_{lref} + K_1 \dot{d}_1] \quad (22)$$

از برابر قراردادن (۲۲) با (۲۱)،  $w$  بدست می‌آید:

$$w = -(K_1)(e_2 - K_1 e_1) - \frac{1}{S} e_1 e_2 - \dot{d}_2 - \dot{d}_1 + \ddot{X}_{lref} - a_1 \operatorname{sgn}(S) - a_2 S \quad (23)$$

با جایگذاری (۲۳) در (۹)،  $u$  به عنوان کنترل کننده تنظیم خروجی بدست می‌آید. ساختار کنترل کننده پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳): ساختار کنترل مبدل باک DC-DC تحت رویکرد کنترل پیشنهادی

### ۳-۵- تحلیل پایداری کنترل کننده پیشنهادی

برای اطمینان از پایداری سیستم کلی، رابطه (۲۴)، که رابطه دوم تابع لیاپانوف می‌باشد، انتخاب شده است:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} S^2 + \frac{1}{2} d_2^2 \quad (24)$$

که در این رابطه،  $\dot{d}_2 = d_2 - \dot{d}_2$ . با مشتق گرفتن از رابطه (۲۴) داریم:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + S\dot{S} + d_2 \dot{d}_2 \quad (25)$$

با جاگذاری روابط ENDO و (۱۸) در (۲۵)، خواهیم داشت:

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - a_1 |S| \operatorname{sgn}(S) - a_2 S^2 + e_1 \dot{d}_1 + d_1 \dot{d}_1 - m_{11} d_1^2 - m_{21} d_2^2 + d_2 \dot{d}_2 + S[k_1 \dot{d}_1 + \dot{d}_2] \quad (26)$$

با فرض اینکه اغتشاشات محدود هستند، روابط (۲۷) و (۲۸) حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} |d_1| < |\dot{d}_1| \\ |d_2| < |\dot{d}_2| \end{cases} \quad (27)$$

## ۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، سیستم نشان داده شده در شکل ۲ در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده است. جدول ۱ پارامترهای نامی سیستم شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. اثربخشی کنترل‌کننده طراحی شده در این بخش، تحت حالت‌های بهره‌برداری مختلف، با در نظر گرفتن تغییرات توان، تغییرات ولتاژ ورودی و تغییرات ولتاژ مرجع ارزیابی می‌شود. عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده با استفاده از سه مطالعه موردی ذکر شده در زیر، ارائه می‌شود:

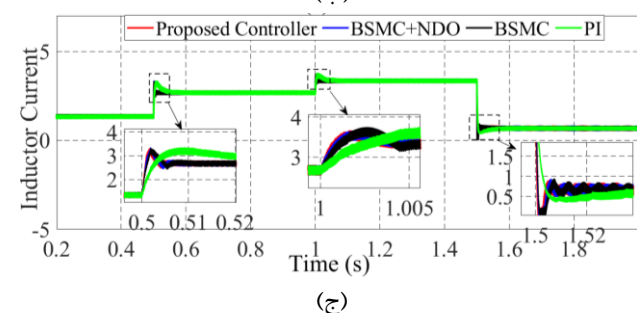
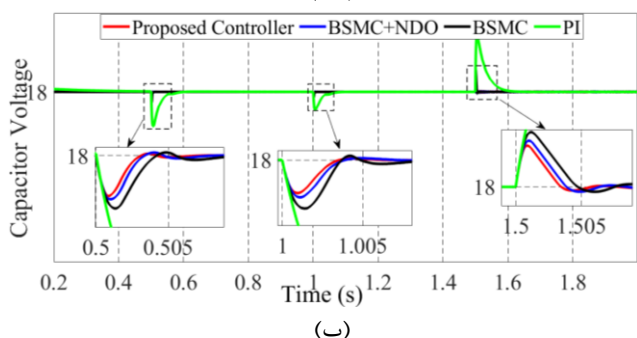
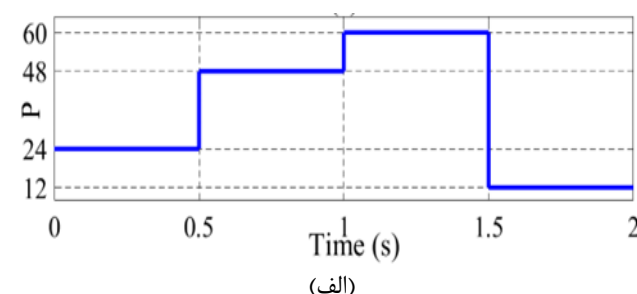
(۱) تغییرات در توان CPL

(۲) تغییرات در ولتاژ ورودی

(۳) تغییرات در ولتاژ مرجع

جدول (۱): پارامترهای مبدل باک ریزشبه

| مبدل باک                                      | مقادیر             |
|-----------------------------------------------|--------------------|
| سلف (L)                                       | 850 $\mu$ H        |
| خازن (C)                                      | 1000 $\mu$ F       |
| ولتاژ ورودی (E)                               | 24 v               |
| ولتاژ باس مرجع ( $V_c$ )                      | 18 v               |
| فرکانس کلیدزنی ( $f_s$ )                      | 20 KHz             |
| توان (P)                                      | 24 W               |
| مقادیر سیستم کنترلی                           | مقادیر             |
| مقادیر ENDO: $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$ | 2000, 500, 200, 20 |
| مقادیر $K_1$                                  | 2000               |
| مقادیر $a_1, a_2$                             | 2000, 1750         |



شکل (۵): نمایش دینامیک سیستم در حالت تغییرات توان CPL:

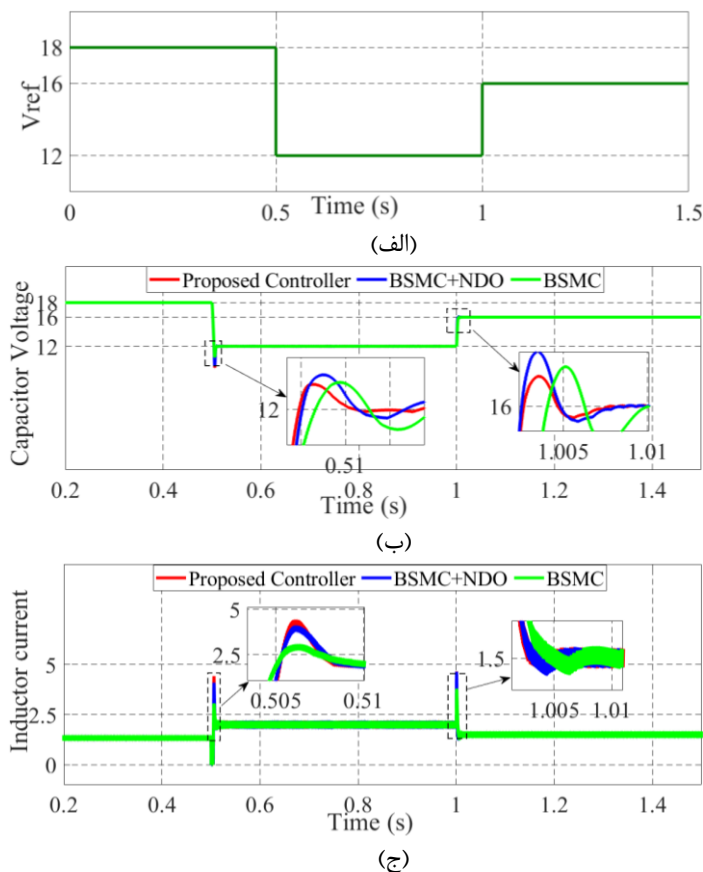
الف- تغییرات توان CPL، ب- ولتاژ باس DC و ج- جریان سلف ورودی

همچنین نتایج نشان می‌دهند که در مقایسه با BSMC، BSMC+NDO و PI، کنترل‌کننده پیشنهادی می‌تواند واکنش‌های دینامیکی سریع‌تری را با فراجش کمتر ارائه دهد.

همچنین، عملکرد کنترل‌کننده غیرخطی پیشنهادی با سایر روش‌ها برای نشان دادن برتری آن مقایسه شده است.

## ۲-۴- تست تغییرات ولتاژ ورودی

در این قسمت، عملکرد دینامیکی کنترل‌کننده پیشنهادی با اعمال تغییرات سیگنال بزرگ در ولتاژ ورودی (مطابق شکل ۶-الف) ارزیابی شده است. توان CPL در این حالت برابر با ۲۴ وات در نظر گرفته شده است و سایر پارامترها مطابق جدول ۱ است. تحت این تغییرات بزرگ در ولتاژ تغذیه ورودی، پاسخ دینامیکی ولتاژ باس DC و جریان سلف ورودی به ترتیب در شکل ۶-ب و ۶-ج نشان داده شده است. از شکل ۶، می‌توان مشاهده کرد که ولتاژ باس DC و جریان ورودی سلف با طرح کنترل تطبیقی طراحی شده، فراجش کمتر و پاسخ دینامیکی سریعتری را دارا می‌باشد.



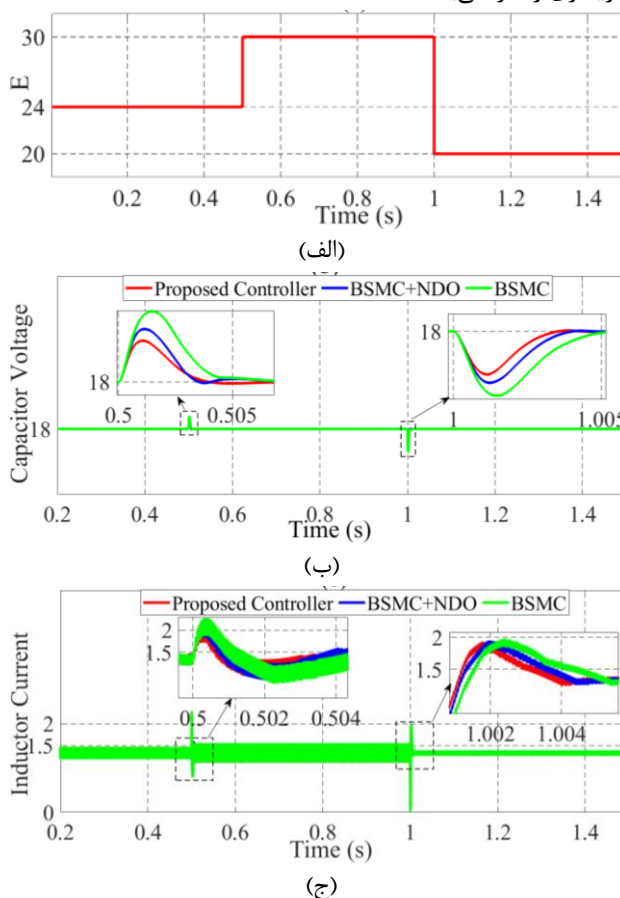
شکل (۷): نمایش دینامیک سیستم در حالت تغییرات ولتاژ مرجع: الف- تغییرات ولتاژ مرجع، ب- ولتاژ باس DC و ج- جریان سلف ورودی

جدول (۲): درصد فراجش/فروجهش و زمان نشست ولتاژ باس DC

در اثر تغییرات مورد مطالعه

| روش کنترلی          |  | زمان نشست (ms) |             |          | درصد فراجش/فروجهش |             |
|---------------------|--|----------------|-------------|----------|-------------------|-------------|
|                     |  | ولتاژ مرجع     | ولتاژ ورودی | توان CPL | ولتاژ مرجع        | ولتاژ ورودی |
| Proposed Controller |  | ۷.۵            | ۸           | ۶        | ۰.۳۶              | ۴.۰۲        |
| BSMC+NDO            |  | ۸.۶            | ۸.۵         | ۶.۸      | ۰.۶۶              | ۴.۸۰        |
| BSMC                |  | ۱۲             | ۹.۹         | ۷.۹      | ۰.۴۸              | ۶.۰۱        |

معمولاً خطا نسبت به مقدار مرجع به‌عنوان بخش مهمی از ارزیابی در نظر گرفته می‌شوند. ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی و سایر روش‌ها، نسبت به خطا در جدول ۳ ارائه شده است. این جدول، بر اساس سه شاخص است که عبارتند از: خطای مربع انتگرال<sup>۱۳</sup> (ISE)،

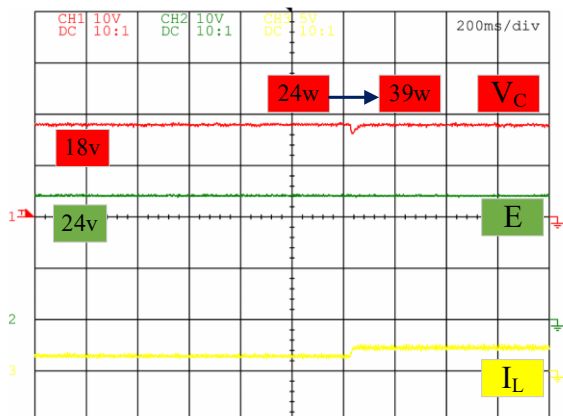


شکل (۸): نمایش دینامیک سیستم در حالت تغییرات ولتاژ ورودی: الف- تغییرات ولتاژ ورودی، ب- ولتاژ باس DC و ج- جریان سلف ورودی

## ۳-۴- تست تغییرات ولتاژ مرجع

در این قسمت، عملکرد دینامیکی کنترل‌کننده پیشنهادی با اعمال تغییرات سیگنال بزرگ در ولتاژ مرجع (مطابق شکل ۷-الف) ارزیابی شده است. توان CPL در این حالت برابر با ۲۴ وات در نظر گرفته شده است و سایر پارامترها مطابق جدول ۱ است. تحت این تغییرات بزرگ در ولتاژ مرجع، پاسخ دینامیکی ولتاژ باس DC و جریان سلف ورودی به ترتیب در شکل ۷-ب و ۷-ج نشان داده شده است. از شکل ۷، می‌توان مشاهده کرد که ولتاژ باس DC و جریان ورودی سلف با کنترل

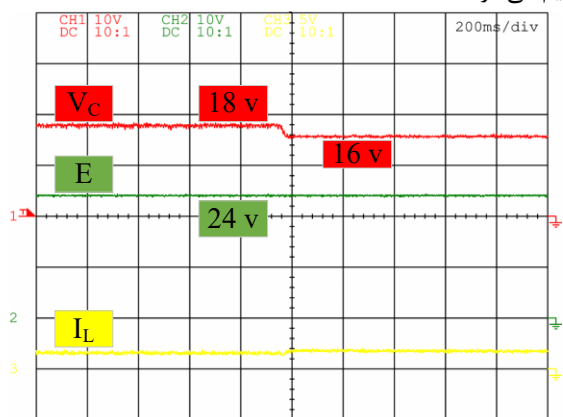
حالت ولتاژ منبع ورودی (E) ثابت و برابر با ۲۴ ولت در نظر گرفته شده است. با تغییر توان، مشاهده می‌شود که لحظه‌ای که توان CPL به طور ناگهانی تغییر می‌کند، ولتاژ ریزش شبکه ( $V_C$ ) ثابت مانده و با پاسخ دینامیکی سریع بر روی مقدار مرجع ۱۸ ولت تنظیم می‌شود.



شکل (۹): نتیجه تست آزمایشگاهی در طول تغییرات ناگهانی در توان CPL

## ۵-۲- تست آزمایشگاهی تغییرات ولتاژ مرجع

همچنین شکل ۱۰ نیز نتیجه تست آزمایشگاهی مبدل باک در حضور تغییرات ولتاژ مرجع را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، ولتاژ مرجع از ۱۸ ولت به ۱۶ ولت تغییر می‌کند. لحظه‌ای که ولتاژ مرجع به طور ناگهانی تغییر می‌کند،  $V_C$  با پاسخ دینامیکی سریع روی ۱۶ ولت تنظیم می‌شود.



شکل (۱۰): نتیجه تست آزمایشگاهی در طول تغییرات ناگهانی در ولتاژ مرجع

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک کنترل‌کننده برای مبدل باک DC-DC با CPL معرفی شده است که مقاومت در برابر ناپایداری CPL دارد. این کنترل‌کننده پیشنهادی از ترکیب دو کنترل‌کننده استفاده می‌کند تا مزایای هرکدام را برای پوشش‌دادن معایب یکدیگر بکار گیرد. با استفاده از این، کنترل‌کننده تطبیقی، پایداری سیستم را در شرایط با حضور اغتشاشات تضمین می‌کند و عملکرد بسیار سریع‌تر و با

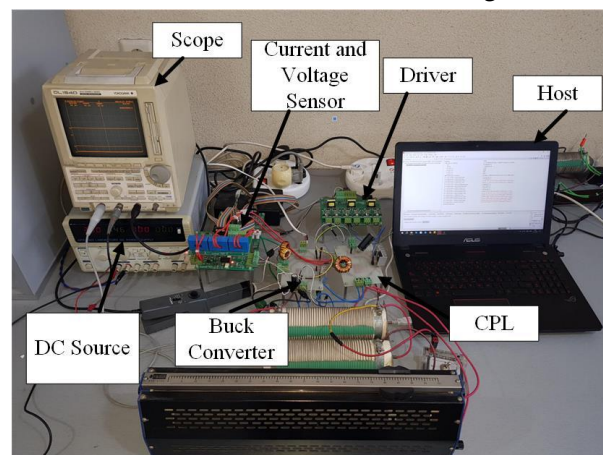
خطای مربع زمانی انتگرال<sup>۱۴</sup> (ITSE) و خطای مطلق زمان انتگرال<sup>۱۵</sup> (ITAE) است. مطابق با این جدول، کنترل‌کننده پیشنهادی پاسخ بهتری نسبت به دیگر روش‌ها ارائه می‌دهد.

جدول (۳): مقایسه عملکرد خطاهای مختلف

| روش‌ها       | تغییرات ولتاژ ورودی      | تغییرات ولتاژ مرجع       | تغییرات توان CPL         | شاخص‌ها |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------|
| BSMC         | $13.6832 \times 10^{-2}$ | $12.9950 \times 10^{-2}$ | $22.016 \times 10^{-2}$  | ISE     |
|              | $29.3516 \times 10^{-6}$ | $28.4726 \times 10^{-6}$ | $59.3047 \times 10^{-6}$ | ITSE    |
|              | $28.0092 \times 10^{-5}$ | $27.1099 \times 10^{-5}$ | $42.4058 \times 10^{-5}$ | ITAE    |
| BSMC+ND O    | $13.1112 \times 10^{-2}$ | $12.0198 \times 10^{-2}$ | $15.7156 \times 10^{-2}$ | ISE     |
|              | $28.3178 \times 10^{-6}$ | $26.3042 \times 10^{-6}$ | $41.5757 \times 10^{-6}$ | ITSE    |
|              | $27.2574 \times 10^{-5}$ | $25.1019 \times 10^{-5}$ | $29.4812 \times 10^{-5}$ | ITAE    |
| روش پیشنهادی | $12.8252 \times 10^{-2}$ | $10.556 \times 10^{-2}$  | $12.5771 \times 10^{-2}$ | ISE     |
|              | $27.6855 \times 10^{-6}$ | $23.1027 \times 10^{-6}$ | $33.2730 \times 10^{-6}$ | ITSE    |
|              | $25.2248 \times 10^{-5}$ | $21.9219 \times 10^{-5}$ | $24.1510 \times 10^{-5}$ | ITAE    |

## ۵- نتایج تست آزمایشگاهی

شکل ۸ شمای مدار آزمایشگاهی مورد استفاده برای سنجش عملی کنترل‌کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد. کنترل‌کننده پیشنهادی با میکروکنترلر DSP TMS320F28335 C2000 بر روی مبدل باک DC-DC اعمال شده است.



شکل (۸): ساختار آزمایشگاهی مبدل باک DC-DC با بار CPL

## ۵-۱- تست آزمایشگاهی تغییرات توان

در این قسمت، مقدار توان CPL همان‌طور که در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد، از ۲۴ وات به ۳۹ وات تغییر داده می‌شود. در این

- buck converter with constant power load", IEEE Access, vol. 10, pp. 71837-71852, 2022.
- [11] M. Cao, S. Li, J. Yang, and K. Zhang, "Mismatched Disturbance Compensation Enhanced Robust  $H_\infty$  Control for the DC-DC Boost Converter Feeding Constant Power Loads", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.38, no. 2, pp. 1300-1310, 2022.
- [12] Q. Xu, C. Zhang, C. Wen, and P. Wang, "A novel composite nonlinear controller for stabilization of constant power load in DC microgrid", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 1, pp. 752-761, 2017.
- [13] Z. Ding and Applications, "Semi-global stabilisation of a class of non-minimum phase non-linear output-feedback systems", IEE Proceedings-Control Theory and Applications vol. 152, no. 4, pp. 460-464, 2005.
- [14] M. Abdolahi, J. Adabi, and S. Y. M. Mousavi, "An Adaptive Extended Kalman Filter with Passivity-Based Control for DC-DC Converter in DC Microgrids Supplying Constant Power Loads", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 71, no. 05, pp.4873-4882, 2023.
- [15] S. Singh, D. Fulwani, and V. Kumar, "Robust sliding-mode control of dc/dc boost converter feeding a constant power load", IET Power Electronics, vol. 8, no. 7, pp. 1230-1237, 2015.
- [16] M. Saeedi, J. Zarei, R. Razavi-Far, and M. Saif, "Event-triggered adaptive optimal fast terminal sliding mode control under denial-of-service attacks", IEEE Systems Journal, vol. 16, no. 2, pp. 2684-2692, 2021.
- [17] B. A. Unni and P. R. Kumar, "Higher order sliding mode control based duty-ratio controller for the DC/DC buck converter with constant power loads", 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 2016, pp. 656-661 : IEEE.
- [18] H. El Fadil and F. Giri, "Backstepping based control of PWM DC-DC boost power converters", 2007 IEEE international symposium on industrial electronics, 2007, pp. 395-400: IEEE.
- [19] X. Li, X. Zhang, W. Jiang, J. Wang, P. Wang, and X. Wu, "A novel assorted nonlinear stabilizer for DC-DC multilevel boost converter with constant power load in DC microgrid", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 10, pp. 11181-11192, 2020.
- [20] J. Wu and Y. Lu, "Adaptive backstepping sliding mode control for boost converter with constant power load", IEEE Access vol. 7, pp. 50797-50807, 2019.
- [21] M. Alipour, J. Zarei, R. Razavi-Far, M. Saif, N. Mijatovic, and T. Dragičević, "Observer-based backstepping sliding mode control design for microgrids feeding a constant power load", IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 70, no. 1, pp. 465-473, 2022.

## زیر نویس ها

<sup>1</sup> Constant power load

<sup>2</sup> Backstepping controller

<sup>3</sup> Sliding mode controller

<sup>4</sup> Extended nonlinear disturbance observer

<sup>5</sup> Nonlinear disturbance observer

<sup>6</sup> Distributed generation

فراجهش کمتر نسبت به روش PI ارائه می‌دهد. همچنین استفاده از ناظر اغتشاشات ENDO برای پاسخگویی به اثرات نامعین CPL و اغتشاشات بکار می‌رود. باتوجه به اهمیت رفع ناپایداری CPL در ریزشکدهای DC و افزایش توجه به این نوع شبکه‌ها در صنعت، کنترل پایداری این سیستم‌ها امری حیاتی و ضروری است. کنترل‌کننده پیشنهادی در این مقاله قابلیت پیاده‌سازی بر روی سایر مبدل‌های DC-DC را دارد و عملکرد مناسبی نشان داده است.

## مراجع

- [1] hasanpour S. Design and Implementation of a New Step-Up DC-DC Converter with Two Extended Outputs for Renewable Energy Applications. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2024; 21 (2) :13-24
- [2] Parin F, Farshidi E, fani R. Analysis, design and implementation of a new high step-up DC-DC converter with active coupled inductor network for a sustainable energy system. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2024; 21 (1) :85-95
- [3] A. Rajamallaiiah, S. P. K. Karri, and Y. R. Sankar, "Deep Reinforcement Learning Based Control Strategy for Voltage Regulation of DC-DC Buck Converter Feeding CPLs in DC Microgrid", IEEE Access, vol. 12, pp.17419-17430, 2024.
- [4] S. Hosseinnataj, M. Yazdani, M. Shekari, M. Jani, and J. Adabi, "Bidirectional DISO DC-DC converter based on Lyapunov control strategy", 2023 14th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), 2023, pp. 1-5: IEEE.
- [5] M. N. Dehaghania, M. Biglarahmadia, S. M. Mousavi, and M. A. Abdolahi, "A Distributed Cooperative Secondary Control Scheme for Obtaining Power and Voltage References of Distributed Generations in Islanded DC Microgrids", International Journal of Engineering, vol. 37, no. 2, p. 341, 2024.
- [6] M. A. Hassan, C.-L. Su, J. Pou, D. Almakhlis, T.-S. Zhan, and K.-Y. Lo, "Robust Passivity-Based Control for Interleaved Bidirectional dc-dc Power Converter With Constant Power Loads in DC Shipboard Microgrid", IEEE Transactions on Transportation, vol. 10, no. 2, pp.3590-3602, 2023.
- [7] A. M. Abdurraqueeb et al., "Stabilization of constant power loads and dynamic current sharing in DC microgrid using robust control technique", Electric Power Systems Research, vol. 230, p.110258 , 2024.
- [8] M. Abdolahi, J. Adabi, S. Y. Mousazadeh Mousavi, and Applications, "A passivity control and developed nonlinear disturbance observer for boost converter with constant power load in DC microgrid", International Journal of Circuit Theory and Applications, Vol. 52, no. 11, pp. 5859-5876, 2024.
- [9] M. A. Hassan et al., "DC Shipboard Microgrids with Constant Power Loads: A Review of Advanced Nonlinear Control Strategies and Stabilization Techniques", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 5, pp.3422-3438, 2022.
- [10] C. A. Torres-Pinzón, F. Flores-Bahamonde, J. A. Garriga-Castillo, H. Valderrama-Blavi, R. Haroun, and L. Martinez-Salamero, "Sliding-mode control of a quadratic

---

<sup>7</sup> Energy storage systems

<sup>8</sup> Boost

<sup>9</sup> Chattering

<sup>10</sup> Backstepping sliding mode Controller

<sup>11</sup> Exact feedback linearization

<sup>12</sup> Duty cycle

<sup>13</sup> Integral square error

<sup>14</sup> Integral time square error

<sup>15</sup> Integral time absolute error