Karafan

Quarterly Scientific Journal of National University of Skill

Spring 2026, Vol. 23, No. 1, p.208- 238

Journal Homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en

:10.48301/kssa.2025.484036.3024

Control of single switch cascaded boost converter based on feedback linearization method with TEG

Milad Chanddel[1], Mahdi Hedayati[2*], Javad Olamaei[3], Reza Effatnejad[4], Ebrahim Salary[5]

[1,2,4,5] Department of Electrical Engineering, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.

[3] Department of Electrical Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received:2024.11.04
Revised: 2025.03.14
Accepted:2025.12.14

Keyword:
Single Switch Cascaded Boost Converter
GA Algorithm
ITSE
Offered Feedback Linearization (OFBL)
TEG

***Corresponding Author:**
Mahdi Hedayati
Email:
mhedayati@iau.ac.ir

ABSTRACT

One of the most useful DC-DC converters is called the boost converter, and they are used to increasing and stabilize the output voltage in renewable energies such as thermoelectric Generator systems. For converter of TEG systems, The structures have been provided, which can be mentioned as single switch cascaded boost converter. The choppers are non-linear in nature, so fixed parameter controllers cannot display a suitable dynamic behavior for step and parametric changes, so designing a suitable controller in regard to uncertainties such as temperature changes has become an important challenge. In this research, moreover the experimental modeling of the TEG module, a nonlinear controller based onOffered Feedback Linearization (OFBL) method is proposed to control the output voltage of the cascaded boost chopper, and its coefficients are also optimized by GA. In order to check the transient response of the aforementioned converter, the ITSE function is considered. For evaluating the proposed controller, five scenarios of constant input, step-up changes, step-down changes and combined changes in input voltage and Apply TEGS as input have been analyzed. Also, at the end of the simulation, the output load changes are considered. The mentioned simulations were done in Simulink MATLAB. The results of the simulations state that the proposed controller, due to its simple structure, has succeeded in tracking the reference voltage and has demonstrated an acceptable performance for stabilizing the output voltage, especially in TEG systems.

©2024 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Numerous hot springs in Iran have led the electricity industry to take a special look at Thermoelectric Generator (TEG) systems. In order to use the TEG module, it is enough to use hot and cold sources on the ceramic sides of the module to produce electromotive force proportional to temperature changes, according to Seebeck theorem. The main problem of these systems is the issue of temperature uncertainty because the generated voltage is highly dependent on temperature changes. The recorded voltage information of a sample thermoelectric module by the data logger is shown in Figure 1.

Figure 1. The output voltage of a sample thermoelectric module recorded by the data logger.

In this research, in order to increase the efficiency of TEG systems, a single switch cascaded boost converter based on Offered Feedback Linearization (OFBL) controller is proposed. An example of a single-switch cascaded boost converter based on IC555 is shown in Figure 2.

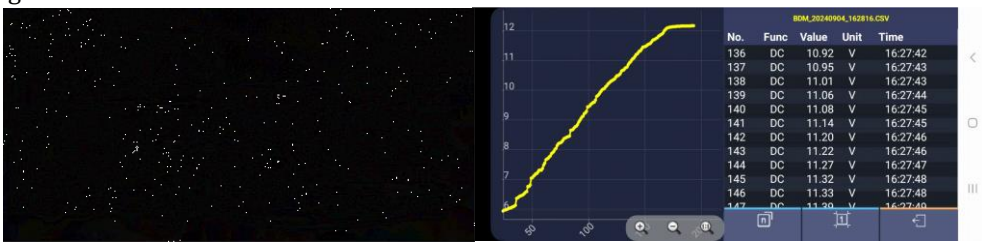


Figure 2. cascade booster chopper based on IC555 (Vin= 5VDC).

Besides, the modeling of the sample thermoelectric module is presented. ITSE and Genetic Algorithm (GA) have been used as objective function and algorithm respectively. With the aim to challenge the OFBL controller, the five scenarios have been included in the simulation section. At the end of the simulation, the output load changes are considered. It is worth noting that the scenarios are designed based on the uncertainty of step changes so that the proposed OFBL controller indirectly faces the challenge of temperature changes to check the controller's performance.

Methodology

This research consists of two basic parts, the first part is dedicated to the experimental modeling of a typical thermoelectric module, and the second part is to design a controller based on an Offered Feedback Linearization in order to control the voltage of a single switch cascaded boost converter. The laboratory activity for modeling the sample TEG module is shown in Figure 3 and the results of this test are shown in Figure 4.

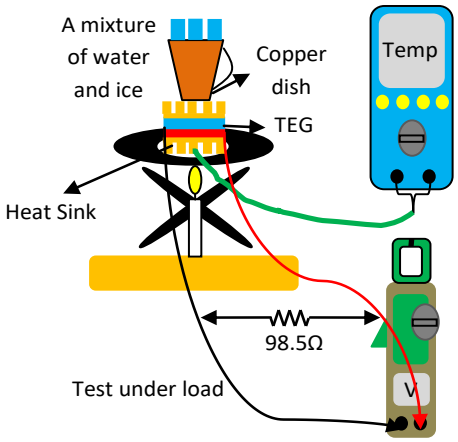


Figure 3. Laboratory activity for thermoelectric module modelling.

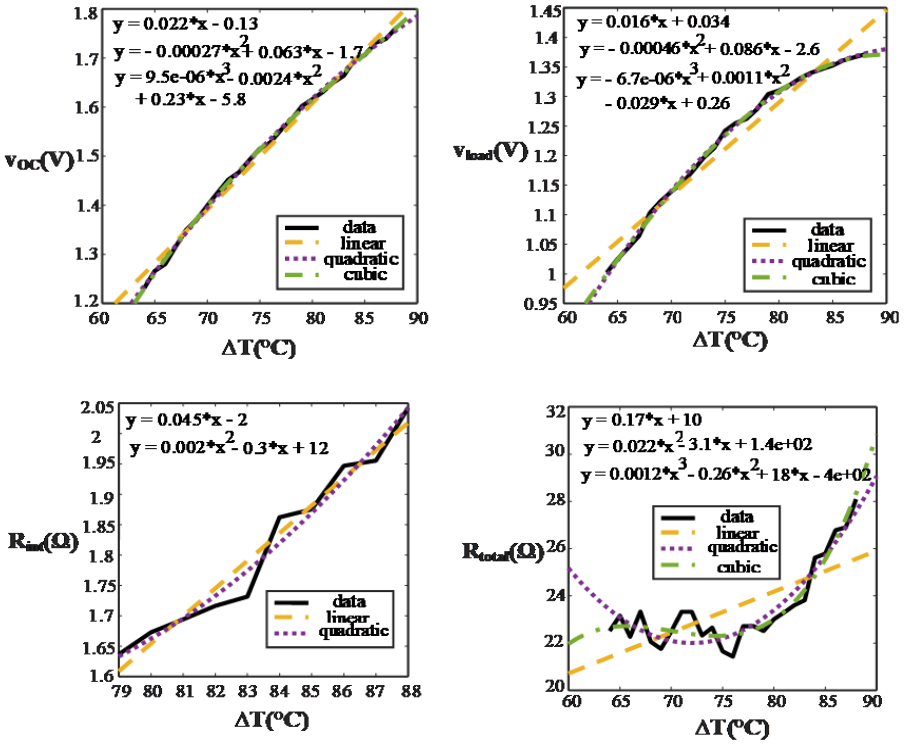


Figure 4. The results of laboratory work.

In order to optimize the parameters of the controller and output capacitor of the converter, Genetic Algorithm and ITSE function have been used. Among other objective functions that have been investigated, IAE, ISE and ITAE can also be mentioned. To evaluate the OFBL controller, five scenarios such as presence of TEG and combined changes in input has been investigated. The effect of changing the load on the output voltage has also been checked. In this research, in addition to the mentioned cases, the design of TEG array and circuit diagram of the proposed controller are also discussed. The designed TEG array and the control law for the switching of the cascaded converter are shown in Figures 5 and 6 respectively.The proposed control law for voltage tracking and stabilization is given in Equation (1).

$$u = \frac{\dot{i}_{L1} - \frac{1}{R} v_{C2} - i_{L2}}{i_{L2}} \tag{1}$$

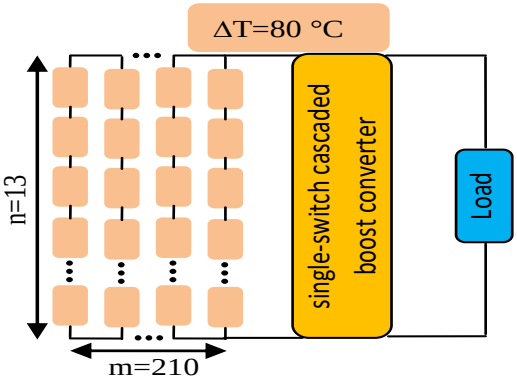


Figure 5. Designed TEG array with a capacity of 1100 watt.

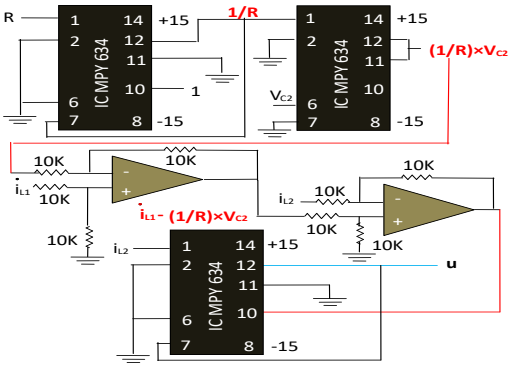


Figure 6. Circuit diagram of control law.

Results and discussion

The simulation results in the 5 defined scenarios show that the OFBL controller, when faced with parametric changes and uncertainties such as temperature changes, can track the voltage well and stabilize the voltage at the defined operating point. Compared to controllers like FOPID, the OFBL controller also showed its superiority in items such as settling time and rise time. Comparison between controllers OFBL, PID, FOPID, PI and IDA-PBC and Quantitative analysis of scenarios are given in Tables 1 and 2, respectively.

Table 1. Comparison of OFBL controller with FOPID, PID, PI and IDA-PBC [19,26].

Scenario	Evaluation Criteria	Controller				
		PI[26]	IDA-PBC[26]	PID[19]	FOPID[19]	OFBL
+%25 Tsim=0.05 S, (Vin=25V)	Settling time (S)	----------	----------	0.017	0.008	0.0019
	Rise time (S)	----------	----------	0.0013	0.001	3.2570e-4
Tsim=0.25 S,Vin=10 V, Vo=40 V, K=0.28	Settling time (S)	0.2	0.03	----------	----------	0.0122

Table 2. Quantitative analysis of the proposed controller.

Scenario	ITSE(%)	Overshoot(%)	Rise time (S)	Settling time (S)	Peak (V)	Peak time (S)
Scenario1	0.13	0.0119	8.4705e-4	0.0040	72.0673	0.0583

Scenario2 +%25	8.2432e-2	0.0101	3.2830e-4	0.0029	72.0448	0.0593
Scenario2 ↑changes	1.52	----------	----------	----------	----------	----------
Scenario3 -%25	0.25	0.0540	0.0018	0.0058	72.1517	0.0283
Scenario3 ↓changes	4.79	----------	----------	----------	----------	----------
Scenario4 ↓↑changes	4.94	----------	----------	----------	----------	----------
Scenario5 TEG	1.33	0.1814	0.0029	0.0479	72.1031	0.1573
Vin=18V, R=125Ω	0.13	0.2447	8.1975e-4	0.0037	72.2777	0.0123
Vin=18V, R=75Ω	0.14	0.0137	8.7896e-4	0.0049	71.9902	0.0593

By examining the simulations, it can be concluded that the OFBL controller has an acceptable performance in tracking the reference voltage, and due to its simple structure, it can guarantee voltage stabilization in TEG and PV systems.

Conclusions

In the present study, the exact modeling of the TEG system based on the laboratory activity was described. Also, the design of a TEG array with a capacity of 1100 watt was explained based on cascaded boost converter; then, the OFBL controller was presented to stabilize the voltage of the single switch cascaded boost converter. In addition, the circuit diagram model of the proposed controller was also introduced for use in renewable energies. The simulation results stated that the proposed controller has a reliable performance in facing uncertainties such combined changes in input voltage and can quickly track and stabilize the reference voltage. Also, compared to PID, FOPID, PI and IDA-PBC controllers, this controller showed its superiority in items such as settling time and rise time. The OFBL controller has a simple structure, easy implementation and high speed, and its other capability can be mentioned as a proper control conduct in error elimination

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه ملی مهارت
بهار ۱۴۰۵، دوره ۲۳، شماره ۱، ۲۳۸-۲۰۸
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir
doi: 10.48301/kssa.2025.484036.3024

کنترل مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ مبتنی بر روش خطی‌ساز فیدبک با حضور ترموالکتریک

میلاد چنددل [۱]، مهدی هدایتی [۲*]، جواد علمائی [۳]، رضا عفت‌نژاد [۴]، ابراهیم سالاری [۵]

۱، ۲، ۴ و ۵-گروه مهندسی برق، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.
۳- گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

کلید واژگان:
مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ
الگوریتم ژنتیک
ITSE
خطی‌سازی فیدبک‌پیشنهادی (OFBL)
ترموالکتریک

***نویسنده مسئول:** مهدی هدایتی
پست الکترونیکی:
mhedayati@iau.ac.ir

چکیده

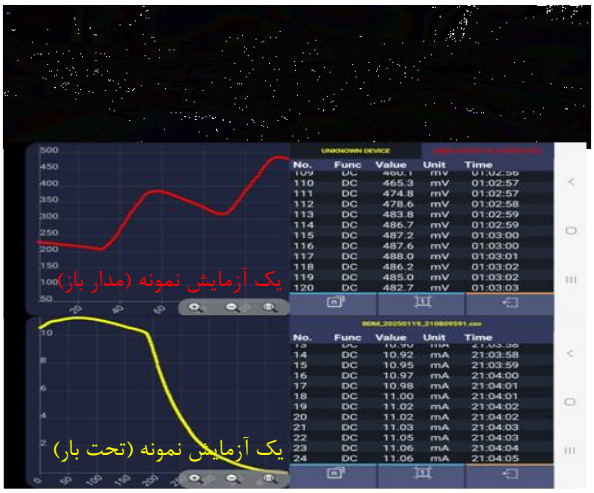
یکی از کاربردی‌ترین کانورترهای DC-DC مبدل بوست نام داشته و جهت افزایش و تثبیت ولتاژ خروجی در انرژی‌های تجدیدپذیری مثل سیستم‌های ترموالکتریک مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مبدل بوست سیستم‌هایTEG، ساختارهایی ارائه شده که می‌توان به مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ اشاره کرد. چاپرها ماهیت غیرخطی دارند لذا کنترل‌کننده‌های پارامتر ثابت نمی‌توانند رفتار دینامیکی مناسبی را به ازای تغییرات پله‌ای و پارامتریک از خود به نمایش بگذارند لذا طراحی یک کنترل‌کننده غیرخطی مناسب با توجه به عدم‌قطعیت‌هایی مثل تغییرات دما به چالش مهمی تبدیل گشته است. در این تحقیق علاوه بر مدل سازی تجربی ماژول TEG، برای کنترل ولتاژ خروجی مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ، کنترل‌کننده‌ای مبتنی بر روش خطی‌سازی فیدبک پیشنهادی (OFBL) ارائه شده و ضرائب آن نیز توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. جهت بررسی پاسخ گذرا مبدل مذکور تابع هدف ITSE درنظر گرفته شده است. به منظور ارزیابی کنترل‌کننده پیشنهادی، پنج سناریو ورودی ثابت، تغییرات پله‌ای صعودی، تغییرات نزولی و تغییرات ترکیبی در ولتاژ ورودی و اعمال سیستم TEG به عنوان ورودی، مورد تحلیل واقع شده، همچنین در انتهای شبیه سازی بحث تغییرات بار خروجی نیز درنظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های مذکور در سیمولینک MATLAB انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها بیان می‌کند که کنترل‌کننده پیشنهادی با توجه به ساختار ساده‌ای که دارددر ردیابی ولتاژ مرجع موفق عمل کرده و کارکرد قابل قبولی را جهت تثبیت ولتاژ خروجی به ویژه در سیستم های ترموالکتریکاز خود به نمایش می‌گذارد.

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

©2024 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

اتصال و بهره‌برداری منابع تولیدپراکنده‌ای مثل نیروگاه‌های فتوولتائیک، سیستم‌های ترموالکتریک و سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی در سیستم‌های قدرت معمولا در دو مرحله اتفاق می‌افتد. در گام اول سطح ولتاژ خروجی ریزمولدها با استفاده از چاپرهای افزاینده DC-DC مثل مبدل بوست آبشاری بالا برده شده و سپس در گام دوم با استفاده از مبدل DC-AC و همچنین با رعایت استانداردهای تعریف شده (ولتاژ، فرکانس، مسائل کیفیت توان وغیره) به شبکه متصل می‌گردند. به فرآیند اتصال و بهره‌برداری ریزمولدها اصطلاحا Plug and Play نیز گفته می شود[1; 2]. جهت بازیابی انرژی هدررفت در نیروگاه‌های بخاری و گازی می‌توان از ماژول‌های ترموالکتریک استفاده کرد، در صورتی که اختلاف دمایی به طرفین سرامیکی ماژول اعمال گردد، تفاوت دمایی مستقیما به نیروی محرکه الکتریکی تبدیل خواهد شد.جهت افزایش ولتاژ کافی است چند ماژول به طور سری قرار گرفته تا ولتاژ مطلوب حاصل گردد. برای استفاده از این تکنولوژی کافی است که به منبع گرم و سرد دسترسی داشته باشیم. از محاسن سیستم‌های ترموالکتریک می‌توان به طول عمر بالا ماژول‌ها، هزینه تعمیرات و نگه‌داری پایین و عدم ایجاد آلودگی صوتی اشاره کرد. از سیستم TEG در صنایع مختلفی از جمله نیروگاه‌ها، فولاد، مس و در بخش‌هایی نظیر دیگ بخار و کوره جهت بازیابی انرژی استفاده می‌گردد[3; 4]. اطلاعات ولتاژی و جریانی ثبت شده یک ماژول TEGتوسطدیتالاگردر شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌گردد با افزایش تغییرات دما ولتاژ خروجی افزایش و با کاهش دما ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد لذا اینجا بحث تثبیت ولتاژ در سیستم‌های ترموالکتریک به یک مساله ضروری تبدیل می‌گردد. در سیستم‌های TEG با توجه به اینکه بازده پایینی هم دارند حضور یک مبدل بوست ضروری است. یکی از مبدل‌هایی که می‌توان برای سیستم‌های TEG استفاده کرد مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ می‌باشد. از مزایای آن می‌توان به بهره ولتاژ بالا و تک سوئیچ بودن آن اشاره داشت که کار طراحی کنترل‌کننده را راحت می‌کند[5].



شکل ۱. اطلاعات ولتاژی و جریانی ثبت شده یک ماژول ترموالکتریک نمونه توسط دیتالاگر

یکی از مشکلات اساسی که در طراحی مبدل‌های سیستم‌های ترموالکتریک مطرح می‌باشد بحث تغییرات دما بوده که در مطالعات پژوهشی مانند مرجع [6] کمتر مورد توجه قرار گرفته است. نیروی محرکه الکتریکی تولید شده توسط سیستم‌های TEG وابسته به تغییرات دما می‌باشد، از این رو علاوه‌بر مدل‌سازی دقیق سیستم TEG، طراحی

کنترل‌کننده‌ای منعطف با قابلیت ردیابی ولتاژ از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. مبدل‌های بوست ماهیت غیرخطی از خود بروز می‌دهند، به عبارت دیگر چون رفتار غیرمینیمم‌فاز دارند لذا عکس‌العمل و تقابل خاصی را در برابر ورودی و عدم‌قطعیت‌ها از خود نشان می‌دهند، همین امر منجر می‌گردد که کنترل‌کننده‌های خطی عملکرد ضعیفی داشته و کنترل‌کننده های غیرخطی مثل خطی‌سازی فیدبک جایگزین گردند[7]. محققین در مرجع [8] چاپر افزاینده DBDPC۱ را برای سیستم‌های فتوولتائیک پیشنهاد داده‌اند، از مزایای این روش می‌توان دستیابی به بهره مناسب و عملکرد قابل قبول در بحث MPPT۲ را اشاره کرد ولی عیبی که به این پژوهش وارد است بحث استفاده از کنترل‌کننده پارامتر ثابت است چرا که مبدل پیشنهاد شده ماهیت غیرخطی دارد و بهتر است از یک کنترل‌کننده غیرخطی مثل متد پیش‌بین استفاده کرد[8]. طرح‌های کنترلی که با اهدافی مثل ردیابی نقطه ماکزیمم توان و کنترل ولتاژ خروجی در چاپرها مورد استفاده قرار می‌گیرند اصولا به ۴ دسته طبقه‌بندی می شوند:۱- کنترل‌کننده‌های پارامتر ثابت (مانند PID، FOPID۳ و (PDμ(K+PIλ) ۲- کنترل‌کننده‌های مقاوم (مانند H∞) ۳- متدهای تطبیقی(این نوع از متدها به دو دسته مبتنی بر شناساگر و غیرتخمین‌گر دسته‌بندی می شوند.) ۴- تکنیک‌های هوشمند (مانند تکنیک فازی، فازی نوع ۲، شبکه عصبی، الگوریتم‌های ترکیبی و هوشمند)[9; 10]. رویکردی مبتنی بر کنترل مقاوم، جهت کنترل ولتاژ خروجی چاپر افزاینده پیشنهاد شده است [11] که از معایب آن می‌توان به پیچیدگی در فرآیند طراحی و محاسبات اشاره کرد. مرجع [12]، یک مبدل افزاینده با ویژگی‌هایی مثل راندمان بالا و سوئیچینگ نرم را پیشنهاد داده است ولی عملکرد مبدل و طرح کنترلی را در برابر عدم‌قطعیت‌های واقعی تحلیل نکرده است. محققین در مرجع [13] برای ایجاد تعادل ولتاژ در خازن‌های انتهای چاپرهای افزاینده سه سطحی از روش خطی‌سازی فیدبک استفاده کرده‌اند[13]. پژوهشگران در مرجع [14] معتقدند که منطق فازی از پتانسیل بالایی برای کنترل مبدل‌های قدرت برخوردار است چرا که به مدل دقیق ریاضی نیاز نداشته و علاوه بر اینکه رفتار مقاومی را از خود بروز می‌دهد، در برابر تغییرات پارامتریک و افزایش یا کاهش ولتاژ ورودی مبدل تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. منطق فازی پیاده‌سازی راحتی دارد ولی از لحاظ طراحی به منظور تثبیت ولتاژ خروجی و یا بحث MPPT به شدت خسته‌کننده و زمان‌بر بوده و فرآیند کندی ایجاد خواهد کرد، از طرفی اثبات و گارانتی کردن متد فازی کار سختی می‌باشد. لازم به ذکر است که در مرجع [14]، کنترل‌کننده فازی با کنترل‌کننده‌های PI و SMC۴ مقایسه شده است[14]. پژوهندگان در مرجع [15] روشی را مبتنی بر خطی سازی فیدبک برای مبدل بوست پیشنهاد داده‌اند. از مزایای کنترل‌کننده پیشنهادی مرجع [15] می‌توان به حذف تقریبی خطای حالت ماندگار ولتاژ خروجی اشاره کرد. از مزایای روش خطی‌سازی فیدبک می‌توان به زمان‌بر نبودن فرآیند طراحی، ندا شتن پیچیدگی زیاد در محاسبات، ردیابی سریع و قابلیت عملیاتی شدن اشاره کرد[15]. از سایر کارهای پژوهشی در زمینه کنترل مبدل‌های بوست می‌توان به استفاده از روش خطی ساز فیدبک دقیق برای کنترل مبدل بوست ۳ مرحله اشاره کرد[13]. ساختار مبدل ۳ سطحی به گونه‌ای است که به جای یک خازن در خروجی، از دو خازن استفاده می‌شود حال اگر به جای خطی‌ساز فیدبک از یک کنترل‌کننده پارامتر ثابت استفاده شود این امکان وجود دارد که به دلیل تلرانس عناصر و یا عبور جریان از نقطه وسط، ولتاژهای دو خازن خروجی دچار عدم‌تعادل شده و همین مساله منجر به تخریب یا عملکرد نامطلوب مبدل گردد[13]. یک مبدل سوئیچ – خازنی بهبودیافته با ویژگی‌های ممتازی از قبیل تثبیت ولتاژ، سوئیچینگ نرم و مناسب برای کاربردهای توان بالا پیشنهاد شده است[16]، ولی عیبی که به این ساختار وارد است تعداد زیاد المان‌ها است که باعث می شود قابلیت

---

[۱] Double Boost Direct Power Converter

[۲] Maximum Power Point Tracking

[۳] Fractional Order Proportional Integral Derivative

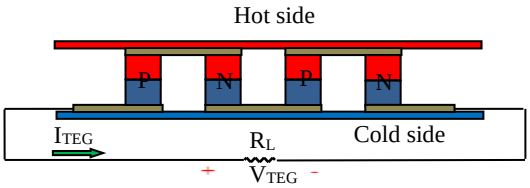
[۴] Sliding Mode Control

اطمینان مبدل کاهش یابد. همچنین استفاده از دو عدد ماسفت در مبدل بحث طراحی سوئیچینگ را با مشکل رو به رو می‌کند، در حالی که مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ علاوه بر اینکه تعداد عناصری کمتری دارد، بهره ولتاژ مناسبی را نیز داشته و همچنین وجود یک ماسفت در ساختار آن بحث طراحی کنترل‌کننده را نیز آسان می‌کند[16]. مبدل بوست و توپولوژی‌های متعدد آن مثل مبدل بوست آبشاری ماهیت غیرخطی داشته و لذا بهتر است یک کنترل‌کننده غیرخطی برای آنها تعریف گردد.

در این پژوهش از روش کنترلی مبتنی بر خطی‌سازی فیدبک استفاده خواهد شد. این پژوهش از ۵ قسمت تشکیل می‌گردد. در بخش اول به معرفی و مدل‌سازی یک ماژول ترموالکتریک نمونه پرداخته و تقریب پارامترهایی از قبیل ولتاژ مدار باز و مقاومت داخلی ماژول ترموالکتریک ارائه خواهد شد. سپس در بخش بعدی مقدمه‌ای از چاپر بوست آبشاری دو سوئیچ مطرح شده و در نهایت ساختارهای مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ به همراه معادلات KCL و KVL بیان خواهد شد. در آیتم بعد فرآیند طراحی کنترل‌کننده OFBL و معادلات حالت مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ در حالت‌های روشن/خاموش بودن ماسفت تعریف خواهد شد. در ادامه نیز قانون سوئیچ‌زنی پیشنهادی که مبتنی بر روش خطی سازی فیدبک می‌باشد بحث شده و سپس در انتهای این بخش طراحی کنترل‌کننده، ساختار قانون کنترلی پیشنهادی با استفاده از دیاگرام مداری جهت کاربرد در صنعت نمایش داده خواهد شد. شبیه‌سازی از ۵ سناریو ورودی ثابت، تغییرات پله‌ای صعودی ولتاژ، تغییرات پله‌ای نزولی ولتاژ و تغییرات پله‌ای ترکیبی در ولتاژ ورودی و همچنین اعمال سیستم ترموالکتریک به عنوان منبع ورودی تشکیل شده تا روش کنترلی پیشنهادی مورد بررسی جدی قرار گرفته و با کنترل‌کننده‌هایPID،FOPID، PI وIDA-PBCنیز مقایسه خواهد گشت. علاوه بر موارد فوق عملکرد کنترل‌کننده به هنگام تغییرات بار نیز مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که سناریوها با الگوگیری از اطلاعات دیتالاگر شکل (۱) طراحی شده و به منظور تعیین پارامترهای بهینه از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. تابع هدفی که در تحقیق مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت انتگرال زمان در مجذور تابع خطا (ITSE) می‌باشد. از سایر معیارهایی که مورد تحلیل قرار خواهد گرفت می‌توان به IAE[۲]،ISE[۱] و ITAE[۳] اشاره کرد. به طور خلاصه نوآوری‌های این پژوهش‌عبارت‌اند از: ۱- مدل‌سازی یک ماژول TEG نمونه مبتنی بر فعالیت آزمایشگاهی ۲- طراحی یک آرایه TEGبا ظرفیت ۱۱۰۰ وات ۳- ارائه یک روش کنترلی مبتنی بر خطی‌سازی فیدبک جهت تثبیت ولتاژ در مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ در آرایه‌های TEG.

ترموالکتریک و مدل‌سازی

سیستم TEG یک تکنولوژی نوظهور و بر مبنای اثر سیبک بوده و جهت تبدیل اختلاف دما به نیروی محرکه الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد[3; 17]. شکل ۲ ساختارماژول ترموالکتریک را نمایش می‌دهد.



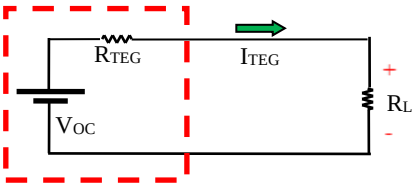
شکل ۲. ساختار ماژول ترموالکتریک به همراه بار [3; 18]

[۱] Integral of Squared Error

[۲] Integral of Absolute Error

[۳] Integral of Time Multiplied Absolute Error

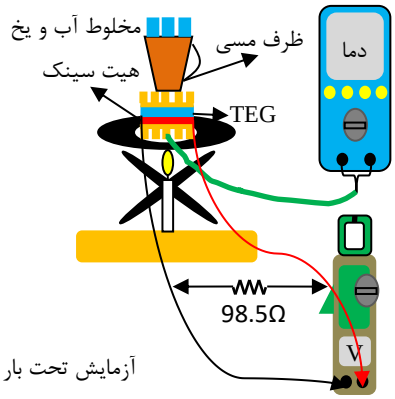
ساختار آن‌ها به گونه‌ای است که معمولا از چندین ترموکوپل تشکیل شده که از لحاظ الکتریکی به طور سری و از لحاظ حرارتی بصورت موازی بین ۲ سطح سرامیکی واقع شده‌اند[18;3]. زمانی که اختلاف دما بین دو سطح سرامیکی ایجاد گردد انرژی الکتریکی ایجاد خواهد شد. مدار معادل ماژول ترموالکتریک در شکل ۳ نمایش داده شده است. رابطه (۱) ولتاژ دو سر بار را بیان می‌کند، α و NTEG به ترتیب ضریب سیبک و تعداد ماژول‌ها می‌باشد[3; 9].



شکل ۳. مدار معادل ماژول ترموالکتریک[3; 18]

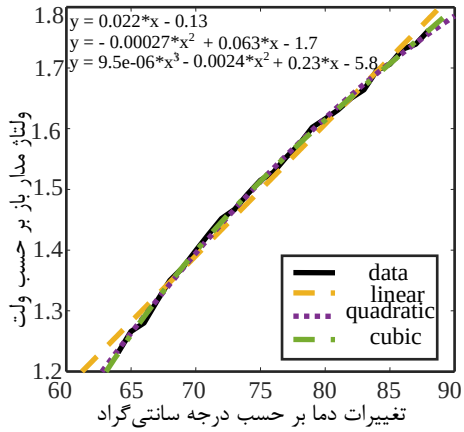
$$V_{load} = V_{OC} - R_{\text{int}} I_{load} = (N_{TEG}\alpha(T_H - T_C)) - R_{\text{int}} I_{load} \quad (۱)$$

فعالیت آزمایشگاهی پیشنهادی جهت تقریب پارامترهای ولتاژ مدار باز و مقاومت داخلی یک ماژول ترموالکتریک نمونه در شکل ۴ نمایش داده شده است.. این آزمایش از دو بخش بی‌باری و تحت بار تشکیل می‌گردد.

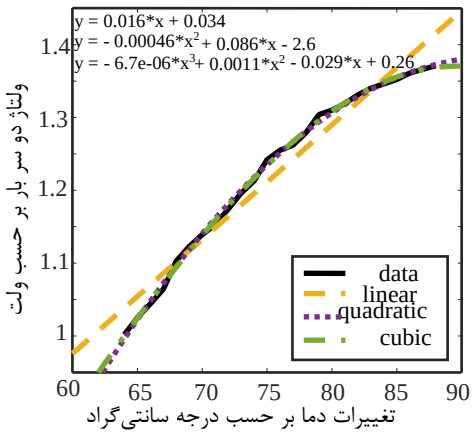


شکل ۴. فعالیت آزمایشگاهی جهت مدل‌سازی ماژول ترموالکتریک

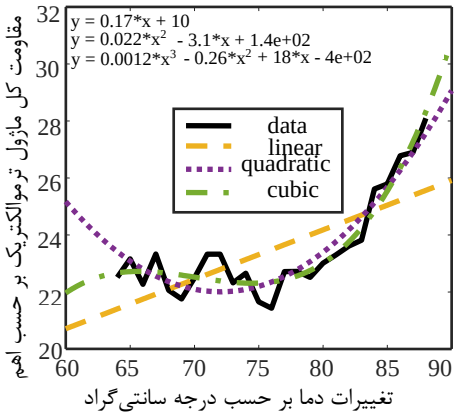
شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب ولتاژ مدار باز وولتاژ دو سر بار را برای یک ماژول نمونه نمایش می‌دهد. باری که به سیستم اعمال شده است یک مقاومت ۹۸,۵ اهمی می‌باشد. داده‌های جمع‌آوری شده توسط معادلات درجه۱، درجه۲ و درجه۳ تقریب زده شده است. دمای طرف سرد ماژول (ظرف مسی با محتویات مخلوط آب و یخ) تقریبا ۰ درجه می‌باشد، برای بخش گرم ماژول نیز از یک وارمر استفاده شده است، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد می‌توان بحث ایجاد انرژی الکتریکی توسط اختلاف دما را اثبات کرد، هر چه اختلاف دما زیاد می شود ولتاژ خروجی نیز افزایش پیدا می‌کند.تقریب مقاومت کل ماژول ترموالکتریک نمونه در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد داده‌های حاصل شده قبل از تغییرات دما ۷۹ درجه سانتی‌گراد، تحلیل را دچار مشکل می‌کند لذا بهتر است داده‌های قبل از ΔT مذکور را حذف کرده و مابقی داده‌ها را مورد استفاده قرار دهیم.طرفین ماژول از هیت سینک استفاده شده است تا انتقال دما در طرفین گرم و سرد بصورت یکنواخت انجام گردد و همچنین از صدمه به ماژول هم جلوگیری شود، این امر باعث می شود که مقاومت داخلی خالص ماژول حاصل نگردد، از اثر منابع سرد و گرم نیز نباید گذشت چرا که مقاومت داخلی به تغییرات دما نیز وابسته است.



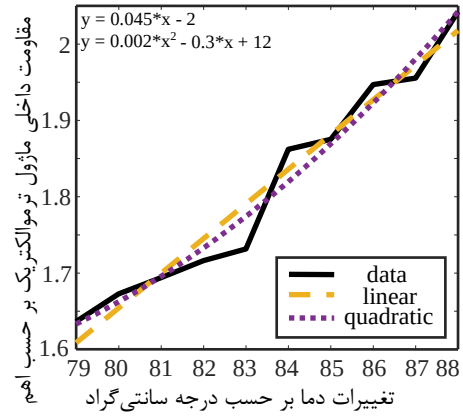
شکل ۵. منحنی ولتاژ مدار باز بر حسب تغییرات دما



شکل ۶. منحنی ولتاژ دو سر بار بر حسب تغییرات دما

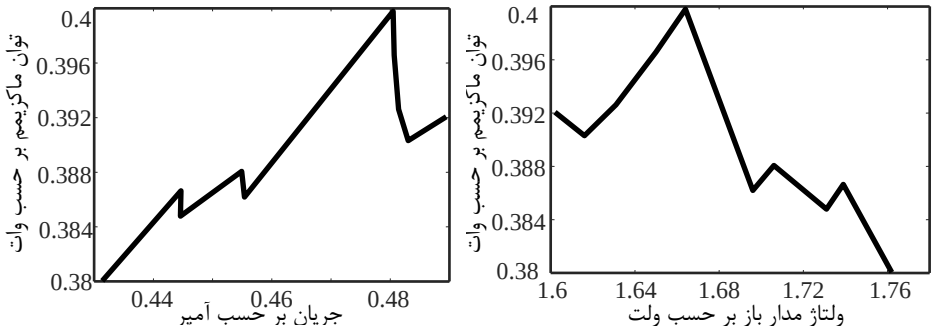


شکل ۷. مقاومت کل ماژول ترموالکتریک



شکل ۸. مقاومت داخلی ماژول نمونه

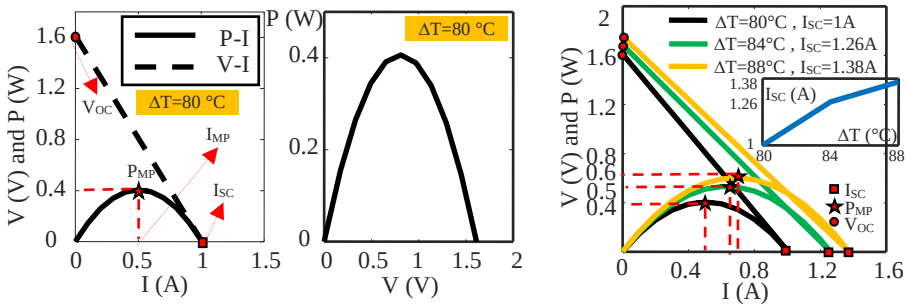
از این رو با توجه به مرجع [9]، تمامی مقاومت‌های حاصل شده را ضربدر ضریبی متناسب می‌کنیم. تقریب مقاومت داخلی ماژول نمونه در شکل ۸ آورده شده است. علت اعتماد به مرجع مذکور نزدیک بودن معادله ولتاژ مدار باز آن‌ها با تقریب کار پژوهشی این تحقیق می‌باشد. شکل‌های (الف) و (ب) ۹ به ترتیب توان ماکزیمم – ولتاژ مدار باز و توان ماکزیمم – جریان ماژول را نمایش می‌دهند.



ب) توان ماکزیمم – جریان الف) توان ماکزیمم – ولتاژ مدار باز

شکل ۹. منحنی‌هایتوان ماکزیمم-ولتاژ مدار بازو توان ماکزیمم – جریان

نمونه‌ای از رفتار الکتریکی یک ماژول نمونه مدل شده در تغییرات دمایی ۸۰ درجه سانتی‌گراد در شکل‌های (ب) و (ج)۱۰ارائه شده است. اثر تغییر دما برولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه و توان ماکزیمم ماژول در بخش (الف) شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



ج) توان – جریان و ولتاژ – جریان ب) توان - ولتاژ الف)اثر تغییر دمابرI_{SC}،V_{OC}وP_{MP}

شکل ۱۰. منحنی‌های ولتاژ-جریان، توان-جریان، توان - ولتاژ و اثر تغییرات دما بر جریانI_{SC}،V_{OC}وP_{MP}

ولتاژ مدار باز با تقریب درجه ۲ و مقاومت داخلی ماژول با تقریب درجه۱ درنظر گرفته شـده اسـت. خط چین(ج) منحنیولتاژ-جریان و خط ممتد مشکی (ج) منحنیتوان – جریان ماژول بررسی شده می‌باشد. یکی از مهم‌ترین نتایجی که می‌توان از شکل (۱۰) استخراج کرد بحث خطی بودن منحنی ولتاژ -جریان در ماژول‌های ترموالکتریک می‌باشد در حالی که در فتوولتائیک منحنی ولتاژ-جریان غیرخطی می‌با شد. در ادامه ق صد داریم یک آرایه ترموالکتریک با ظرفیت توان تولیدی ۱۱۰۰ وات را در تغییرات دمایی ۸۰ درجه سـانتی‌گرادطراحی کنیم. در ابتدا ولتاژ مدار باز و مقاومت داخلی یک ماژول نمونه را طبق روابط (۲) محاسبه می‌کنیم:

$$V_{OC} = -0.00027\Delta T^2 + 0.063\Delta T - 1.7 \Rightarrow V_{OC} = 1.612V \quad (۲)$$
$$R_{int} = 0.045\Delta T - 2 \Rightarrow R_{int} = 1.6\Omega$$

طبق قضـیه انتقال توان ماکزیمم، جریان ماژول نیز تقریبا برابر ۰٫۵ آمپر می‌شـود. تصـور شـود که ولتاژ مدار باز را ۲۰٫۹۵۶ ولت درنظر گرفته‌ایم یعنی ۱۳ ماژول به صورت سری قرار گرفته‌اند، جریان خروجی از آرایه ترموالکتریک نیز تقریبا ۱۰۴٫۹۸ آمپر می‌باشد حال اگر ۱۰۴٫۹۸ را تقسیم بر ۰٫۵ آمپر کنیم تعداد شاخه‌های موازی حاصل می‌گردد که

تقریبا برابر ۲۱۰ می شود. مقاومت داخلی کل آرایه TEG نیز برابر ۰,۰۹۹اهم می‌گردد، مقاومت داخلی کل و ولتاژ مدار باز را برای بخش پایانی شبیه‌سازی استفاده خواهیم کرد.با توجه به شکل‌های ۳ و ۱۰، تحلیل موارد ذکر شده در معادلات(۳)آورده داده شده است.

$$P_{\max}=\frac{V_{OC}^2}{4\times R_{\text{int}}}$$

$$Max\quad Power\quad Theorem \xrightarrow[V_{OC}=1.612V]{R_{\text{int}}=R_{load}=1.6\Omega} I_{Module}=\frac{V_{OC}}{2\times R_{\text{int}}}\approx 0.5A$$

$$P_{\max}=\frac{(2\times R_{\text{int}}\times I_{Module})^2}{4\times R_{\text{int}}}=R_{\text{int}}\times I_{Module}^2$$

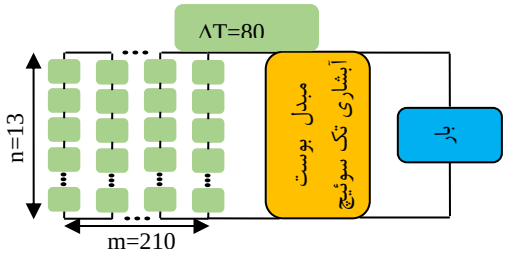
$$Array\quad Output\quad Voltage \xrightarrow{if\quad n=13} V_{OC,Array}=13\times V_{OC}=20.956V \qquad (۳)$$

$$Max\quad Power\quad Theorem \xrightarrow[V_{OC,Array}=20.956V]{P\max=1100W} P\max=\frac{1}{2}V_{OC}\times I_{Array}\longrightarrow I_{Array}\approx 104.98A$$

$$m=\frac{104.98}{0.5}=209.96\approx 210$$

$$R_{\text{int},total}=\frac{n\times 1.6}{m}\approx 0.099\Omega$$

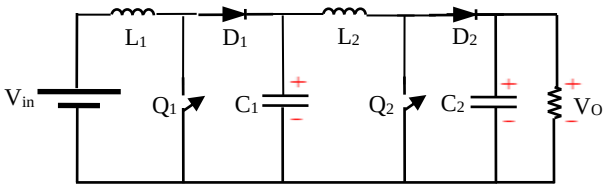
سیستم ترموالکتریک طراحی شده در شکل ۱۱ نمایش داده شده است، n و m به ترتیب تعداد ماژول‌های ترموالکتریک سری شده و تعداد شاخه‌های موازی شده را بیان می‌کند.



شکل ۱۱. سیستم ترموالکتریک طراحی شده

مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ

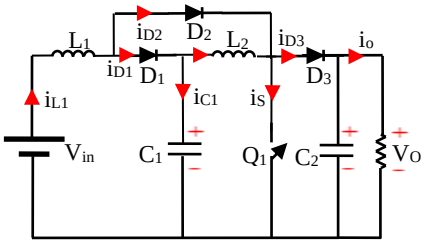
قبل از پرداختن به چاپر افزاینده آبشاری تک سوئیچ بهتر است به مبدل بوست آبشاری دو سوئیچ پرداخته شود. مبدل بوست آبشاری دو سوئیچ که به آن مبدل دو سطحی نیز اطلاق می‌گردد در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. چاپر افزاینده آبشاری دو سوئیچ

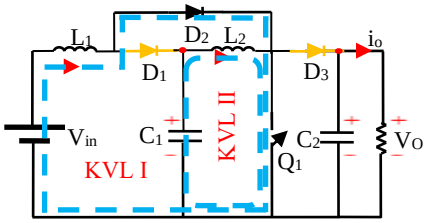
این چاپر از عناصر پسیوی چون ۲ عدد خازن، ۲ عدد القاگر، بار و همچنین از عناصر اکتیوی چون ۲ عدد سوئیچ و دو عدد دیود تشکیل شده است. اگر چه چنین مبدلی بهره ولتاژ بالایی را ایجاد می‌کند ولی به علت وجود دو عدد

سـوئیچ اقتصـادی نبوده و طراحی فرامین کنترلی را پیچیده‌تر می‌کند، به همین دلیل طراحان حوزه الکترونیک قدرت مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ را ترجیح می‌دهند[19]. ساختار مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. این ساختار نسبت به مبدل بوست آبشاری دو سوئیچ یک دیود بیشتر و یک سوئیچ کمتر دارد. معمولا ماسفت به عنوان سوئیچ مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱۳. چاپر افزاینده آبشاری تک سوئیچ[19]

در ادامه به تحلیل مداری مبدل مذکور پرداخته می‌شود. مبدل آبشاری تک سوئیچ دو ساختار مداری دارد در حالی که مبدل دو سوئیچ این‌گونه نیست و دارای ۴ ساختار مداری می‌باشد. زمانی که سوئیچ on باشد ساختار مدار به شرح شکل ۱۴ می‌باشد.همان‌طورکه در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود دیودهای اول و سوم off می‌باشند.



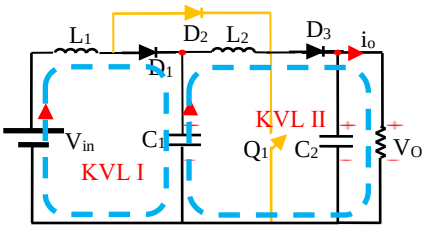
شکل ۱۴. ساختار اول مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ [19]

KVL I و KVL II ساختار اول در معادلات (۴) و (۵) آورده شده است[19]:

$$KVL: -V_{in} + v_{L1} = 0 \Rightarrow v_{L1} = V_{in} \quad (۴)$$

$$KVL: -v_{C1} + v_{L2} = 0 \Rightarrow v_{L2} = v_{C1} \quad (۵)$$

در آرایش دوم چاپر افزاینده آبشاری، Q1 خاموش، D1 و D3 خاموش ولی D2 روشن می‌باشد. ساختار دوم مبدل مذکور در شکل ۱۵ نمایش داده شده است[19]:



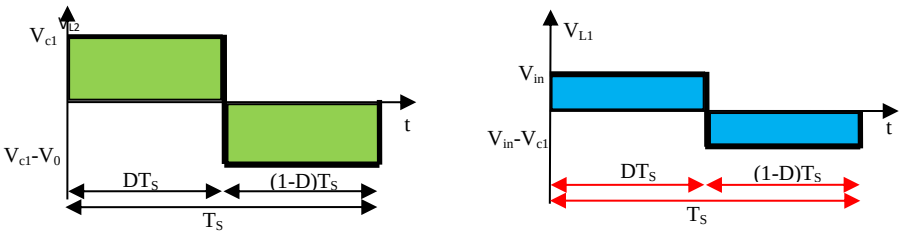
شکل ۱۵. ساختار دوم مبدل بوست آبشاری تک سوئیچ [19]

KVL I و KVL II ساختار دوم مبدل در معادلات (۶) و (۷) تعریف شده است[19]:

$$KVL: -V_{in} + v_{L1} + v_{C1} = 0 \Rightarrow v_{L1} = V_{in} - v_{C1} \quad (۶)$$

$$KVL: -v_{C1} + v_{L2} + V_O = 0 \Rightarrow v_{L2} = v_{C1} - V_O \quad (۷)$$

شکل ۱۶ ولتاژ سلف‌های اول و دوم را برای یک دوره تناوب سوئیچنگ نمایش می‌دهد.



شکل ۱۶. ولتاژ سلف‌های اول و دوم در یک پریود سوئیچینگ

با توجه به قانون ولت-ثانیه، روابط (۸) استخراج می‌گردد، این معادلات بیان می‌کند که متوسط ولتاژ سلف‌ها برای یک پریود سوئیچزنی برابر صفر می‌باشد.

$$\begin{aligned} &< V_{L1} >= \frac{1}{T}\int_0^T v_{L1}(t) = 0 \\ &< V_{L1} >= \frac{V_{in}DT_s + (V_{in} - V_{C1})(1-D)T_S}{T_s} = 0 \\ &< V_{L2} >= \frac{1}{T}\int_0^T v_{L2}(t) = 0 \\ &< V_{L1} >= \frac{V_{C1}DT_s + (V_{C1} - V_O)(1-D)T_S}{T_s} = 0 \end{aligned} \quad (۸)$$

رابطه‌ی بین ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی و چرخه وظیفه با استفاده از روابط (۸) درمعادله (۹) آورده شده است[19; 20]:

$$V_O = \frac{V_{in}}{(1-D)^2} \quad (۹)$$

ولتاژهای خازن اول و دوم و همچنین جریان‌های سلف اول و دوم در حالت ماندگار طبق روابط (۱۰) محاسبه می‌گردند[20]:

$$\begin{aligned} V_{C1} &= \frac{V_{in}}{(1-D)} \\ V_{C2} &= \frac{V_{in}}{(1-D)^2} \\ i_{L1} &= \frac{V_{in}}{(1-D)^4 R} \\ i_{L2} &= \frac{V_{in}}{(1-D)^3 R} \end{aligned} \quad (۱۰)$$

نمونه‌ای از مبدل آبشاری تک سوئیچ مبتنی بر اسیلاتور۵۵۵ آستابل در شکل ۱۷ نمایش داده شده است.

شکل ۱۷. چاپر افزاینده آبشاری مبتنی بر IC555

همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌گردد مدار سوئیچینگ مبتنی بر IC555 پیاده‌سازی شده است. این مدار به نوعی ساده‌ترین مولتی ویبراتور جهت ارسال PWM به بیس ترانزیستور یا گیت ماسفت در مبدل‌های DC-DC محسوب می‌گردد ولی عیبی که به مدار اسیلاتور IC555 آستابل ساده وارد است این است که چرخه وظیفه بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد محدود شده و در برابر عدم‌قطعیت‌ها عملکرد مطلوبی ندارد لذا ابتدا باید ساختار مبدل را شناخت و سپس مبتنی بر رفتار ذاتی مبدل، قانون سوئیچینگ را استخراج کرد. در ادامه به طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی پرداخته می‌شود.

طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر خطی‌ساز فیدبک

ساختار کنترلی پیشنهادی در این پژوهش از ۶ بخش به شرح ذیل تشکیل می‌گردد:

- ✓ بیان معادلات حالت مبدل بوست آبشاری
- ✓ بیان معادلات مرج شده
- ✓ تکنیک خطی‌سازی فیدبک و بیان قانون کنترلی
- ✓ ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی
- ✓ ارائه ساختمان کنترل‌کننده مبتنی بر دیاگرام مداری
- ✓ بهینه‌سازی ضرائب با استفاده از الگوریتم ژنتیک

قبل از معرفی کردن قانون خطی‌سازی فیدبک پیشنهادی، ابتدا در گام اول به بیان معادلات حالت چاپر بوست آبشاری می‌پردازیم، معادلات حالت در زمانی که Q1 وصل است طبق روابط (۱۱) تعریف می‌گردد:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{L1} &= \frac{V_{in}}{L_1} \\ \dot{i}_{L2} &= \frac{v_{C1}}{L_2} \\ \dot{v}_{C1} &= \frac{i_{L2}}{C_1} \\ \dot{v}_{C2} &= \frac{v_{C2}}{RC_2} \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

زمانی که Q1 قطع است معادلات حالت طبق معادلات (۱۲) بیان می‌گردد:

$$\begin{aligned}
\dot{i}_{L1} &= \frac{V_{in}}{L_1} - \frac{v_{C1}}{L_1} \\
\dot{i}_{L2} &= \frac{v_{C1}}{L_2} - \frac{V_O}{L_2} \\
\dot{v}_{C1} &= \frac{i_{L1}}{C_1} - \frac{i_{L2}}{C_1} \\
\dot{v}_{C2} &= \frac{v_{C2}}{RC_2} - \frac{i_{L2}}{C_2}
\end{aligned} \qquad (۱۲)$$

در گام دوم معادلات مرج شـده معادلات (۱۱) و (۱۲) را طبق معادلات (۱۳) تشـکیل می‌دهیم، با توجه وضـعیت سوئیچ u می‌تواند صفر یا یک باشد.

$$\begin{aligned}
\dot{i}_{L1} &= \frac{V_{in}}{L_1} - \frac{v_{C1}}{L_1}(1-u) \\
\dot{i}_{L2} &= \frac{v_{C1}}{L_2} - \frac{V_O}{L_2}(1-u) \\
\dot{v}_{C1} &= (2u-1)\frac{i_{L2}}{C_1} + \frac{i_{L1}}{C_1}(1-u) \\
\dot{v}_{C2} &= \frac{v_{C2}}{RC_2} - \frac{i_{L2}}{C_2}(1-u)
\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

در گام سوم به بیان قانون خطی سازی فیدبک پیشنهادی می‌پردازیم. استراتژی خطی سازی فیدبک، یک تکنیک کنترل غیرخطی محسوب شده و با حذف عوامل غیرخطی، سیستم غیرخطی را به یک سیستم خطی تبدیل می‌کند [21; 22]. طبق مرجع [21] فرم تعمیم‌یافته یک سیستم غیرخطی طبق معادلات (۱۴) تعریف می‌گردد:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= f(x) + g(x)u \\
y &= h(x)
\end{aligned} \qquad (۱۴)$$

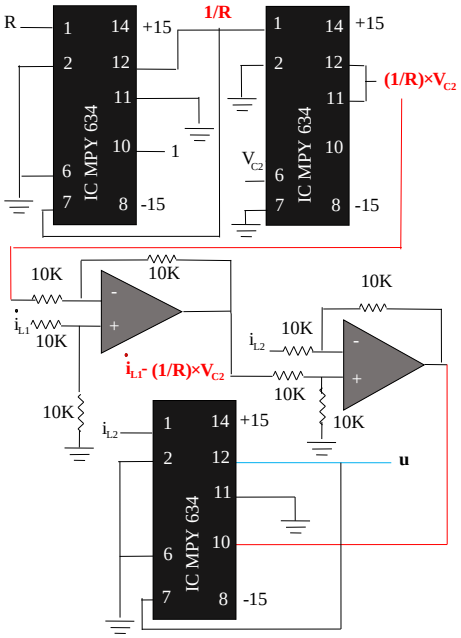
طبق مراجع [15; 21; 23]، قانون کنترل برای مبدل‌های الکترونیک قدرت طبق رابطه (۱۵) تعریف می‌گردد:

$$u = \frac{v - L_f^r h(x)}{L_g L_f^{r-1} h(x)} \qquad (۱۵)$$

بحث مشـــتق لی را می‌توانید از مراجع [15; 21-23]مطالعه بفرمایید. با درنظر گرفتن ولتاژ خازن دوم به عنوان خروجی و تحلیل معادله مرج شده خازن دوم، قانون کنترل پیشنهادی با استفاده از رابطه (۱۵) و انجام تغییراتی مبتنی بر رفتار ذاتی سیستم به شرح معادله (۱۶) بیان می‌گردد:

$$u = \frac{\dot{i}_{L1} - \frac{1}{R}v_{C2} - i_{L2}}{i_{L2}} \qquad (۱۶)$$

ساختار قانون کنترلی u مبتنی بر دیاگرام مداری در شکل ۱۸ آورده شده است.

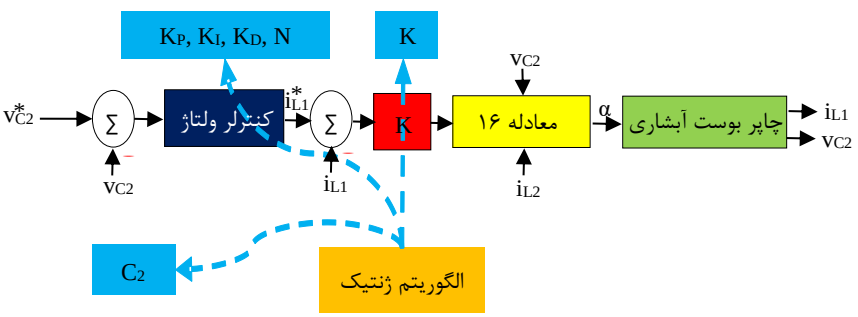


شکل ۱۸. دیاگرام مداری قانون u

با توجه به معادله (۱۶) و مرجع[23]، ساختمان کنترلی پیشنهادی OFBL طبق شکل ۱۹ پیشنهاد می‌گردد. جهت تعیین اندازه بهینه پارامترهای تعیین شده در شکل ۱۹ از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک استاندارد در شکل ۲۰نمایش داده شده و پارامترهای الگوریتم ژنتیک نیز در جدول ۱ بیان گشته است.

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم ژنتیک

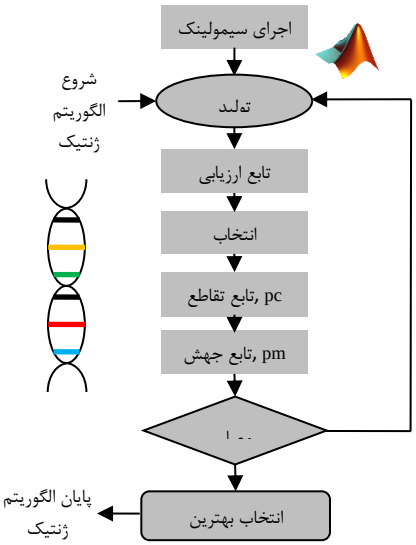
تعدادمتغیر	تعدادجمعیت	حداکثرتکرار	احتمال تقاطع	احتمال جهش
6	50	60	0.9	0.1



شکل ۱۹. ساختار کنترل‌کننده مبتنی بر خطی‌سازی فیدبک

جدول ۲. پارامترها و معیار بهینه‌شده برای سناریو اول

نام پارامتر یا معیار	اندازه بهینه شده
ITSE	0.0013
KP	1.00042
KI	60.1383
KD	0.0228025
N	17.7033
K	7.19799
C2	0.000505395

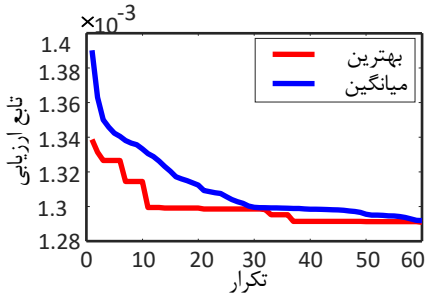


شکل ۲۰. الگوریتم ژنتیک استاندارد [24]

معیاری که به منظور آنالیز رفتار گذرا چاپر افزاینده آبشاری تک سوئیچ پیشنهاد شده استITSE نام داشته که در رابطه (۱۷) تعریف شده است:

$$ITSE = \int_0^{tsim} t.|e(t)|^2 \, dt \qquad (۱۷)$$

مقادیر بهینه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک (Vin=18V) در جدول ۲ نمایش داده شده است. زمان شبیه‌سازی ۰,۰۶ ثانیه لحاظ گشته است.عملکرد الگوریتم ژنتیک در شکل ۲۱ارائه داده شده که محور افقی تکرار و محور عمودی تابع ارزیابی را بیان می‌کند.



شکل ۲۱. عملکرد الگوریتم ژنتیک

در ادامه معیارهای ITAE، ISE و IAE نیز مورد بررســی قرار خواهند گرفت، روابط معیارهای مذکور در معادلات (۱۸) تا (۲۰) ذکر شده است.

$$ITAE = \int_0^{tsim} t.|e(t)| \, dt \qquad (۱۸)$$

$$ISE = \int_0^{tsim} |e(t)|^2 \, dt \qquad (۱۹)$$

$$IAE = \int_0^{tsim} |e(t)|\, dt \qquad (۲۰)$$

جدول ۳ مقادیر معیارهای انتگرال abs تابع خطا، ITAE، انتگرال توان دوم abs تابع خطا و ITSEرا با توجه به اعمال ولتاژ ورودی ۱۸ ولت بیان می‌کند. پارامترهای مبدل بوست آبشاری در جدول ۴ نمایش داده شده است[19].

جدول ۳. مقادیر معیارهای IAE، ITAE، ISE و ITSE

معیار	اندازه
IAE	0.0709
ITAE	1.4125e-4
ISE	3.5278
ITSE	0.0013

جدول ۴. پارامترهای مبدل بوست آبشاری [19]

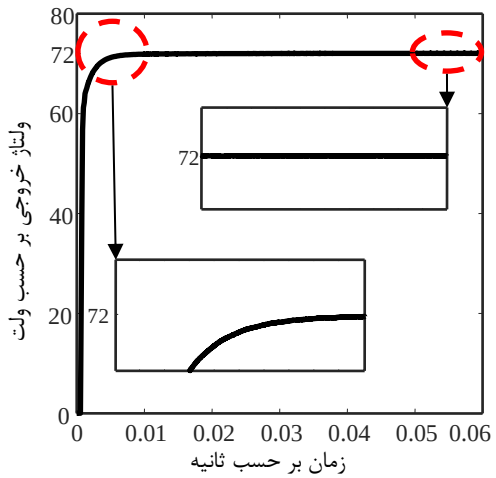
نام قطعه الکترونیکی	اندازه
C1	22 µF
C2	100 µF
L1	90 µH
L2	382 µH
R	100 Ω

شبیه‌سازی

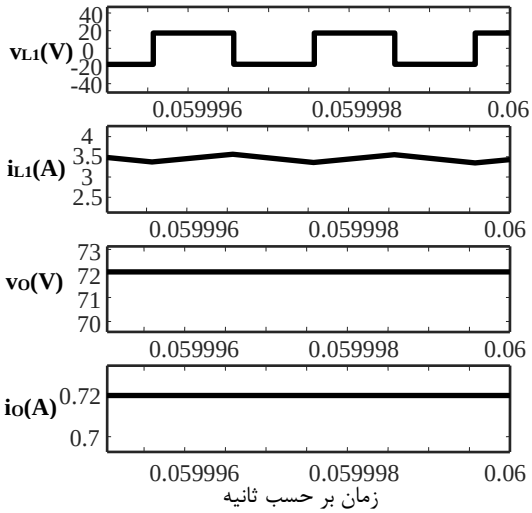
جهت بررسی و به چالش کشیدن کنترل‌کننده پیشنهادی ۵ سناریو تحلیل خواهد شد: ۱- ورودی ثابت ۲- تغییرات پله‌ای صعودی ۳- تغییرات پله‌ای نزولی ۴- تغییرات ترکیبی در ولتاژ ورودی۵- اعمال آرایه TEGطراحی شده به عنوان ورودی.

سناریو۱: ورودی ثابت

در این بخش ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی، چرخه وظیفه و مدت شبیه سازی به ترتیب ۱۸V، ۷۲V، ۰,۵ و ۰,۰۶S می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این سناریو در شکل ۲۲ نمایش داده شده است. با تحلیل شکل ۲۲ درمی‌یابیم که مقدار پیک منحنی در ۰,۰۵۸۳ ثانیه به وقوع پیوسته و مقدار آن نیز ۷۲,۰۶۷۳ ولت است، زمان نشست نیز ۰,۰۰۴۰ ثانیه می‌با شد. از تحلیل‌های فنی ذکر شده می‌توان به این نتیجه ر سید که کنترل‌کننده مبتنی بر خطی ساز فیدبک عملکرد سریعی را از خود به نمایش می‌گذارد. منحنی‌های مربوط به ولتاژ و جریان سلف اول، ولتاژ و جریان خروجیدر شکل ۲۳ ارائه شده است.



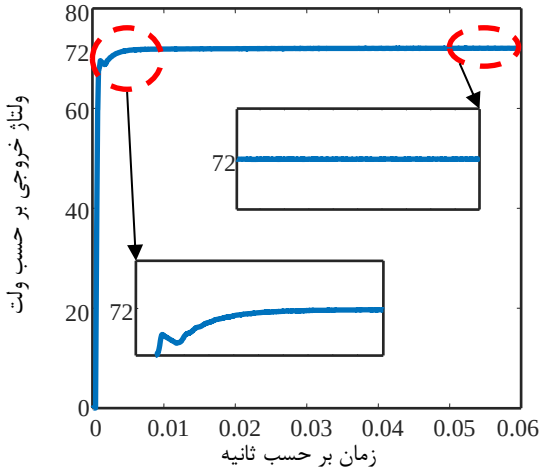
شکل ۲۲. ولتاژ خروجی مبدل در سناریو ۱



شکل ۲۳. منحنی‌های v_{L1}، i_{L1}، v_o و i_o

سناریو۲: تغییرات پله‌ای صعودی

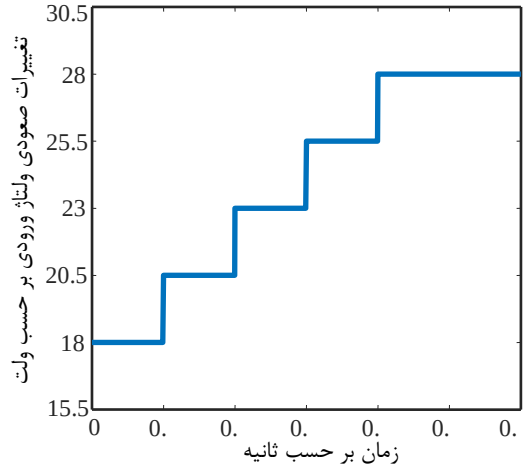
این سناریو از دو قسمت تشکیل شده است: ۱- اعمال ولتاژ ورودی ۲۲,۵ ولتی به چاپر افزاینده آبشاری تک سوئیچ ۲- اعمال تغییرات پله‌ای صعودی با گام‌های ۲,۵ واحدی. ولتاژ خروجی مبدل به ازای افزایش ۴,۵ ولتی در منبع ورودی در شکل ۲۴ نمایش داده شده است. عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی به‌گونه‌ای می باشد که پیک ولتاژ خروجی ۷۲,۰۴۴۸ ولت بوده و با گذشت ۰,۰۰۲۹ ثانیه ولتاژ خروجی آرام گرفته و تثبیت می‌شود.



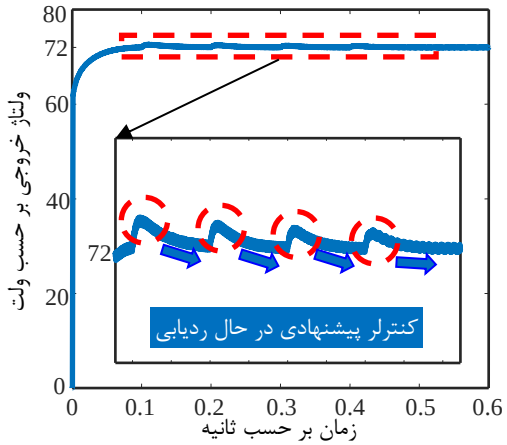
شکل ۲۴. ولتاژ خروجی مبدل به ازای افزایش ۴,۵ ولتی

در انتهای این بخش با اعمال تغییرات پله‌ای صعودی که در شکل ۲۵ نشان داده شده است کنترل‌کننده پیشنهادی مورد چالش قرار می‌گیرد. نتایج در شکل۲۶ ارائه شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی در این سناریو نیز به

هنگام رو به رو شـدن با تغییرات صـعودی ولتاژ رفتار مطلوبی از خود به نمایش می‌گذارد. به عبارت دیگر کنترل‌کننده پیشنهادی در ردیابی ولتاژ مرجع عملکرد خوبی از خود نشان داده و پایداری ولتاژ سیستم را با وجود چنین عدم‌قطعیتی حفظ کرده است.



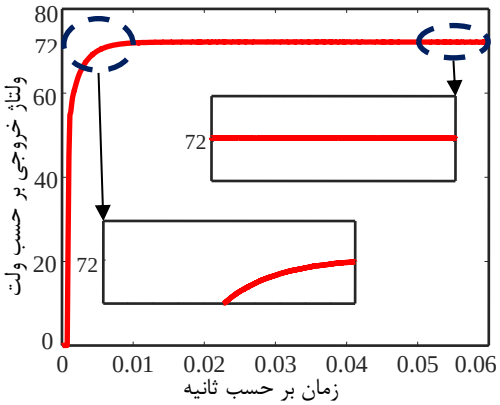
شکل ۲۵. تغییرات صعودی ولتاژ ورودی با پله‌های ۲،۵ واحدی



شکل ۲۶. ولتاژ خروجی به ازای تغییرات پله‌ای صعودی

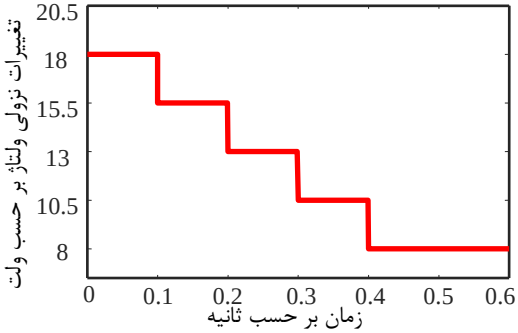
سناریو۳: تغییرات کاهشی در ولتاژ ورودی

این بخش نیز همانند سناریو قبل از دو قسمت تشکیل شده است: ۱- اعمال ولتاژ ورودی ۱۳،۵ ولتی (کاهش ۲۵ در صدی در ورودی) ۲- اعمال تغییرات پله‌ای نزولی با گام‌های ۲،۵ واحدی.از شکل ۲۷ درمی‌یابیم که کنترل‌کننده در مواجه شـدن با ولتاژ ورودی ۱۳،۵ ولتی عملکرد چشـمگیر و قابل‌توجهی را از خود ارائه می‌دهد. در این سـناریو نیز عملکرد کنترل‌کنندهOFBL رضایت‌بخش بوده و سرعت کنترل‌کننده پیشنهادی کاملا مشهود می‌باشد.

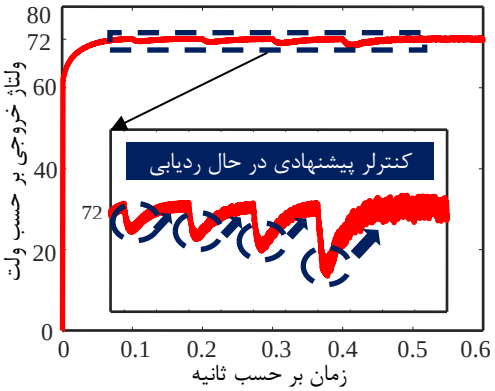


شکل ۲۷. ولتاژ خروجی مبدل در سناریو۳

زمان پیک، مقدار پیک و زمان نشستی که توسط کنترل‌کننده پیشنهادی ایجاد شده است به ترتیب ۰,۰۲۸۳، ۷۲,۱۵۱۷، ۰,۰۰۵۸ می‌باشد. بعد از این مرحله تغییرات نزولی با پله‌های ۲,۵ واحدی که در شکل ۲۸نمایش داده شده به ورودی چاپر اعمال می‌گردد.



شکل ۲۸. تغییرات نزولی ولتاژ ورودی

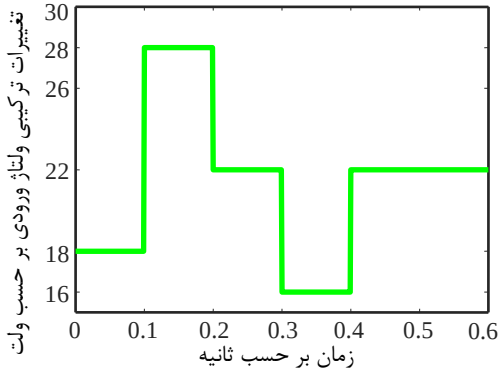


شکل ۲۹. ولتاژ خروجی در بخش دوم سناریو۳

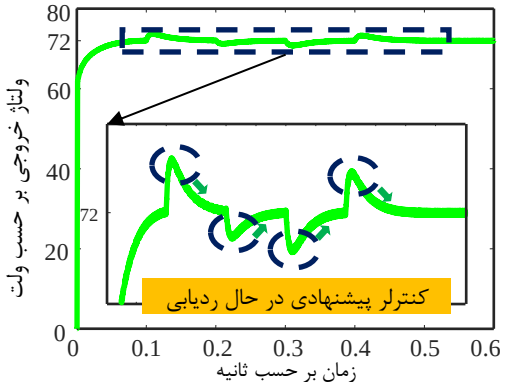
شـــکل ۲۹ بیانگر ولتاژ خروجی مبدل به هنگام رو به رو شـــدن با تغییرات نزولی در مدت زمان ۰٫۶ ثانیه می‌باشد.ردیابی ولتاژ مرجع توسط کنترل‌کننده OFBL در این سناریو نیز به‌خوبی انجام گرفته است.

سناریو۴: تغییرات ترکیبی در ولتاژ ورودی

در سـناریو۴ تغییرات ترکیبی (صـعودی/نزولی) همانند شـکل ۳۰ برای مبدل درنظرگرفته شـده اسـت. عملکرد کنترل‌کنندهOFBL در شکل۳۱ نمایش داده شده ا ست. قدرت ردیابی کنترل‌کننده پی شنهادی در این سناریو نیز آشـکار اسـت. یکی از ویژگی‌های مهمی که برای این کنترل‌کننده می‌توان مطرح کرد بحث سـرعت ردیابی به هنگام برخورد با عدم‌قطعیت‌های ترکیبی مثل کاهش یا افزایش تغییرات دما می‌با شد. به عملکرد مثبت کنترل‌کننده در بحث تثبیت ولتاژ نیز می‌بایست اشاره کرد.



شکل ۳۰. تغییرات ترکیبی صعودی/نزولی



شکل ۳۱. ولتاژ خروجی مبدل بوست آبشاری

سناریو۵: اعمال سیستم TEG به عنوان ورودی

کنترل‌کنندهOFBL در ۴ سناریو گذشته عملکرد قابل‌قبولی را در جهت تثبیت و ردیابی ولتاژ مرجع از خود نشان داده ا ست. در این بخش آرایه ترموالکتریک طراحی شده در بخش مدل سازی را به مبدل آبشاری ا ضافه می‌کنیم تا عملکرد کنترل‌کننده پیشـنهادی برای سـیسـتم‌هایی مثل TEG بررسـی گردد. در این سـناریو مقاومت داخلی آرایه TEG به نوعی مقاومت پارازیتی محسوب می‌شود. نتیجه شبیه‌سازی در مدت زمان شبیه‌سازی ۰٫۶ ثانیه در شکل ۳۲

نمایش داده شده و نتایج کمی این سناریو در جدول ۵ آورده شده است. در این آیتم نیز کنترل‌کننده پیشنهادی با توجه به حضور مقاومت پارازیتی، ولتاژ خروجی را به خوبی تثبیت کرده است. شکل ۳۳ منحنی بعضی از پارامترها از قبیل جریان و ولتاژ خروجی را نمایش می‌دهد.

جدول ۵. شاخص‌های دینامیکی در سناریو۵

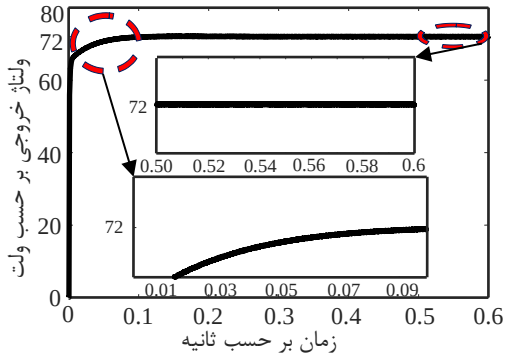
زمان پیک (s)	مقدار پیک (V)	فراجهش (%)	زمان صعود (s)	زمان نشست (s)
0.1573	72.1031	0.1814	0.0029	0.0479

نتایج سناریوها به‌گونه‌ای است که می‌توان ضمانت داد که این کنترل‌کننده جهت تثبیت و ردیابی ولتاژ برای منابعی چون ترموالکتریک، فتوولتائیک، فیوسل، سیستم‌های ذخیره کننده انرژی و خودروهای الکتریکی قابل استفاده می‌باشد. لذا کنترل‌کننده OFBL را می‌توان جهت کنترل ولتاژ پنل‌های PV مرجع[25] مدنظر قرار داد. بازده سیستم TEG در توان‌های خروجی مختلف تقریبا بیش از ۹۰ درصد می‌باشد. جدول ۶ معیارهای IAE، ITAE، ISE و ITSE در سناریو ۵ را بیان می‌کند.

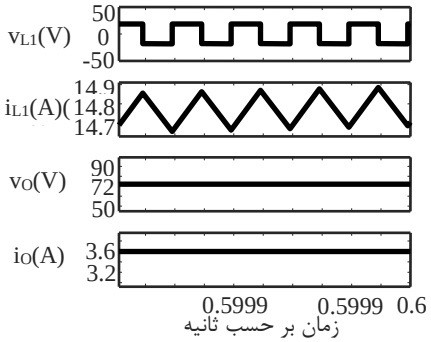
جدول ۶. مقادیر معیارهای IAE، ITAE، ISE و ITSE در سناریو۵

IAE	ITAE	ISE	ITSE
0.2844	0.0098	5.0241	0.0133

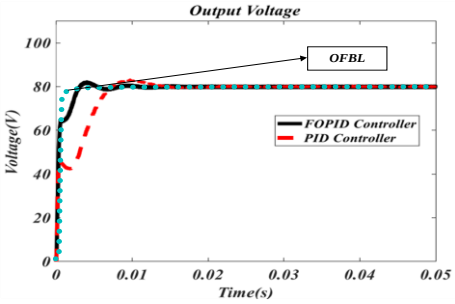
کنترل‌کننده پیشنهادی در بعضی از آیتم‌ها نیز با کنترل‌کننده‌های FOPID، PID، PI و IDA-PBC[19; 26]مقایسه شده است که در این بررسی نیز پیشتازی کنترل‌کننده OFBL کاملا مشهود می‌باشد، این مقایسه در جدول ۷ و در شکل ۳۴ آورده شده است. تحلیل کمی کنترل‌کننده در سناریوها و عملکرد آن به هنگام تغییرات بار خروجی (Vin=18V) در جدول ۸ نمایش داده شده است.شکل ۳۵ ولتاژ خروجی مبدل را در اثر تغییر بار به ازای افزایش و کاهش ۲۵ درصدی (R=75Ω, R=125Ω) نشان می‌دهد (سناریو۱)، در این چالش نیز کنترل‌کننده پیشنهادی رفتار مقاومی را از خود به نمایش می‌گذارد.

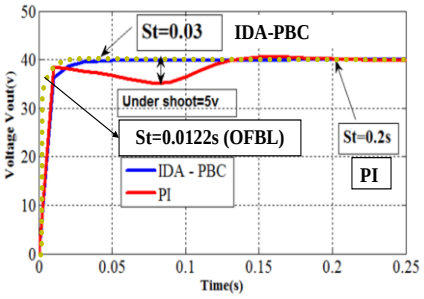


شکل ۳۲. ولتاژ خروجی مبدل بوست آبشاری



شکل ۳۳. منحنی‌های v_{L1}، i_{L1}، v_oو i_o



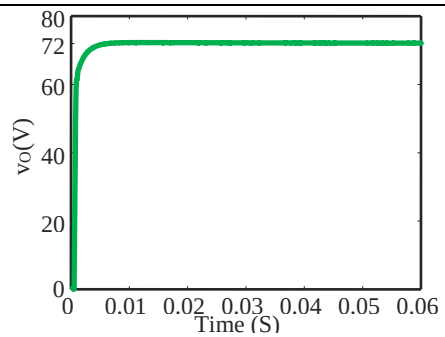


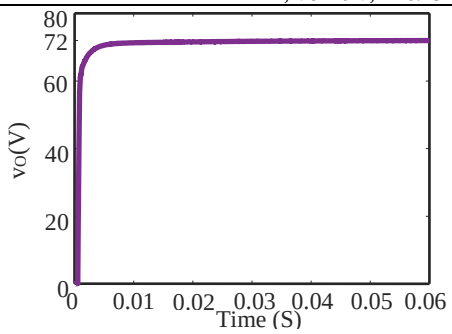
ب) مقایسه کنترل‌کننده OFBL با مرجع [19] **الف) مقایسه کنترل‌کننده OFBL با مرجع [26]**

شکل ۳۴. مقایسه کنترل‌کننده پیشنهادی با مراجع [19; 26]

جدول ۷. مقایسه کنترلر OFBL با کنترل‌کننده‌های FOPID، PID، PIو IDA-PBC[19; 26]

معیار سنجش		نام کنترلر				
		OFBL	FOPID[19]	PID[19]	IDA-PBC[26]	PI[26]
+%25	زمان نشست (s)	0.0019	0.008	0.017	---------	-------
Tsim=0.05 S	زمان صعود (s)	3.2570e-4	0.001	0.0013	---------	-------
Tsim=0.25S,Vin=10V , Vo=40 V, K=0.28	زمان نشست (s)	0.0122	---------	---------	0.03	0.2





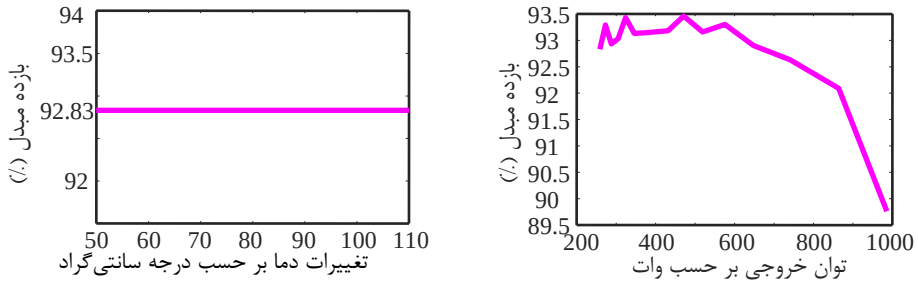
ب) ولتاژ خروجی به ازای ۲۵ درصد افزایش مقدار بار **الف) ولتاژ خروجی به ازای ۲۵ درصد کاهش مقدار بار**

شکل ۳۵. اثر تغییر بار در سناریو۱

جدول ۸. تحلیل کمی کنترلر پیشنهادی

سناریو/معیار	زمان پیک (s)	مقدار پیک (V)	زمان نشست (s)	زمان صعود (s)	فراجهش (%)	ITSE(%)
سناریو۱	0.0583	72.0673	0.0040	8.4705e-4	0.0119	0.13
سناریو۲ +%25	0.0593	72.0448	0.0029	3.2830e-4	0.0101	8.2432e-2
سناریو۲(↑)	---------	----------	----------	----------	----------	1.52
سناریو۳ -%25	0.0283	72.1517	0.0058	0.0018	0.0540	0.25
سناریو۳(↓)	---------	----------	----------	----------	----------	4.79
سناریو۴(↓↑)	---------	----------	----------	----------	----------	4.94
سناریو۵	0.1573	72.1031	0.0479	0.0029	0.1814	1.33
R=125Ω	0.0123	72.2777	0.0037	8.1975e-4	0.2447	0.13
R=75Ω	0.0593	71.9902	0.0049	8.7896e-4	0.0137	0.14

اثر تغییرات بار خروجی و اختلاف دمای ورودی بر بازده مبدل در شکل ۳۶ نمایش داده شده است.



الف) اثر تغییر توان خروجی بر بازده مبدل **ب) اثر تغییرات دما بر بازده مبدل(Pout=259.20W)**

شکل ۳۶. اثر تغییرات بار خروجی و اختلاف دمای ورودی بر بازده مبدل

نتیجه‌گیری

جهت پیاده‌سازی کنترل‌کننده OFBL در سیستم‌های ترموالکتریک ابتدا به معرفی و مدل‌سازی یک ماژول ترموالکتریک نمونه پرداخته شد، سپس ساختار چاپر افزاینده آبشاری تک سوئیچ به همراه معادلات KCL و KVL مربوطه ارائه گشت. در ادامه با کمک گرفتن از معادلات حالت مبدل، کنترل‌کننده‌ای مبتنی بر خطی‌سازی فیدبک (OFBL) جهت تثبیت و ردیابی ولتاژ خروجی مبدل ارائه شد. سپس ساختار دیاگرام مداری کنترل‌کننده OFBL نیز جهت استفاده در سیستم‌های تجدیدپذیر بیان گشت. در بخش شبیه سازی ۵ سناریو ورودی ثابت، تغییرات پله‌ای صعودی، تغییرات پله‌ای نزولیو تغییرات ترکیبی در ولتاژ ورودی و اعمال سیستم TEG به عنوان ورودی لحاظ شد تا کنترل‌کننده پیشنهادی با چالش‌های متنوعی رو به رو گردد، همچنین تغییرات بار نیز درنظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی نشان داد که کنترل‌کننده OFBL به محض مواجه شدن با تغییرات پله‌ای عملکرد مطمئنی داشته و به سرعت می‌تواند ولتاژ مرجع را ردیابی و تثبیت کند. از مزایای کنترل‌کننده OFBL می‌توان به قابلیت پاسخگویی به عدم‌قطعیت‌ها مثل تغییرات دما، ساختار ساده و پیاده‌سازی راحت آن اشاره کرد. همچنین این کنترل‌کننده در مقایسه با کنترل‌کننده‌های FOPID، PID، PI و IDA-PBC نیز برتری خود را در آیتم‌هایی از قبیل زمان نشست و زمان صعود

از خود به نمایش گذاشـــت. لذا این کنترل‌کننده غیرخطی می‌تواند در رویارویی با عدم‌قطعیت‌ها و تغییرات پارامتریک موفق عملکرده و تثبیت ولتاژ را در سیستم‌هایی نظیر فتوولتائیک و ترموالکتریک تضمین کند.

References

[1] Rokrok, E., & Miri, L. (2019). *Single Switch non-Isolated DC-DC Converter with High Gain and Efficiency and Low Input Current Ripple for Photovoltaic Applications*. TABRIZ JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING,49(1), 181-190. https://tjee.tabrizu.ac.ir/article_8693.html. (In Persian)

[2] Effatnejad, R., Hedayati, M., Choopani, K., & Chanddel, M. (2021). Numerical Methods in Selecting Location of Distributed Generation in Energy Network. In *Numerical Methods for Energy Applications* (935-976). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62191-9_34

[3] Jang, Y., Lee, C., & Bae, S. (2023). *Linear-extrapolation-based gray-wolf optimization algorithm for global maximum power tracking of thermoelectric generators*. IEEE Transactions on Energy Conversion,39(1), 17-28. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10214360

[4] Yang, B., Wang, J., Zhang, X., Zhang, M., Shu, H., Li, S., He, T., Yang, L., & Yu, T. (2019). *MPPT design of centralized thermoelectric generation system using adaptive compass search under non-uniform temperature distribution condition*. Energy Conversion and Management,199, 111991. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111991

[5] Alkhaldi, A., Elkhateb, A., & Laverty, D. (2023). *Voltage lifting techniques for non-isolated dc/dc converters*. Electronics,12(3), 718. https://doi.org/10.3390/electronics12030718

[6] Kilani, D., Mohammad, B., & Alhawari, M. (2022). *Switched inductor DC–DC boost regulator using voltage-to-time controller for TEG applications*. Energies,15(9), 3330. https://doi.org/10.3390/en15093330

[7] Zaraei, M., Moradi Zirkohi, M., & Cheraghi Shirazi, N. (2021). *Designing Optimal Neural Networks Controller to Regulate and Control the Output Voltage of DC-DC Boost Converters*. Journal of Communication Engineering,11(42), 41-54. https://sanad.iau.ir/Journal/jce/Article/869902. (In Persian)

[8] Salary, E., & Sabzi, S. (2023). *Providing voltage boosting DC/DC converter with direct connection between source and load*. Journal of Novel Researches on Electrical Power,12(1), 57-70. https://jeps.dezful.iau.ir/article-1-465-fa.html. (In Persian)

[9] Chanddel, M., Olamaei, J., & Jalili Irani, A. (2023). *Load Frequency Control Based on Improved Fuzzy Controller in the Microgrid with Thermoelectric Generator*. Energy Engineering and Management,12(2), 26-37. https://energy.kashanu.ac.ir/article_113582.html?lang=fa. (In Persian)

[10] Chanddel, M., Olamaei, J., Hedayati, M., Effatnejad, R., & Salary, E. (2023, May 30-31). *Intelligent Two-Stage Control of Cascaded Boost Converter Based on Fractional Order PID* The First National Conference on Research and Innovation in Artificial Intelligence, Islamic Azad University Karaj Branch. https://conf.isc.ac/fa/article.php?paperId=556450&cnfId=8898. (In Persian)

[11] Li, G., He, J., & Liu, X. (2024). *A DC voltage robust control strategy of boost converter based on load impedance and input voltage observation*. IEEE

Transactions on Industrial Informatics,20(5), 7947-7956. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10461557

[12] Vesali, M., Abdellahi Khorasgani, A., Ranjbar, H., & Rabiei, M. (2022). *A New High Step-up DC-DC Converter with Soft Switching and High Efficiency*. Karafan Journal,19(3), 333-355. https://karafan.tvu.ac.ir/article_159570.html?lang=fa. (In Persian)

[13] Judewicz, M. G., González, S. A., Gelos, E. M., Fischer, J. R., & Carrica, D. O. (2022). *Exact feedback linearization control of three-level boost converters*. IEEE Transactions on Industrial Electronics,70(2), 1916-1926. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9735152

[14] Raviraj, V., & Sen, P. C. (1997). *Comparative study of proportional-integral, sliding mode, and fuzzy logic controllers for power converters*. IEEE transactions on industry applications,33(2), 518-524. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/568018

[15] Csizmadia, M., Kuczmann, M., & Orosz, T. (2022). *A novel control scheme based on exact feedback linearization achieving robust constant voltage for boost converter*. Electronics,12(1), 57. https://doi.org/10.3390/electronics12010057

[16] Beiranvand, R. (2020). *Analysis of a Switched-Capacitor Converter with Output Voltage Regulation and Soft Switching Capabilities*. TABRIZ JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING,50(2), 587-604. https://tjee.tabrizu.ac.ir/article_10980.html?lang=fa. (In Persian)

[17] Wu, S.-j., Wang, S., Yang, C.-j., & Xie, K.-r. (2018). *Energy management for thermoelectric generators based on maximum power point and load power tracking*. Energy Conversion and Management,177, 55-63. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.040

[18] Jang, Y., Lee, C., Ji, S., & Bae, S. (2021). Hybrid global maximum power point tracking algorithm for a thermoelectric generation system. 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9634344

[19] Mohajery, R., Shayeghi, H., & Villanueva, J. (2021). *PSO-TVAC based optimized FOPID controller for cascaded DC-DC boost converter*. International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE),13, 139-146. https://www.iotpe.com/IJTPE/IJTPE-2021/IJTPE-2021.html

[20] Morales-Saldaña, J. A., Galarza-Quirino, R., Leyva-Ramos, J., Carbajal-Gutierrez, E. E., & Ortiz-Lopez, M. G. (2006). Modeling and control of a cascaded boost converter with a single switch. IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4153136

[21] Priya, F. P., & Latha, K. (2019). Feedback linearization control of boost converter. 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8993341

[22] Slotine, J.-J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control* (199). Prentice hall Englewood Cliffs, NJ. https://books.google.com/books/about/Applied_Nonlinear_Control.html?id=HddxQgAACAAJ

[23] Bacha, S., Munteanu, I., & Bratcu, A. I. (2014). *Power electronic converters: modeling and control* (4). Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-5478-5

[24] Su, J., & Havens, T. C. (2014). Fuzzy community detection in social networks using a genetic algortihm. 2014 IEEE international conference on fuzzy systems (FUZZ-IEEE), https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6891611

[25] Afkar, H., & Esmaeeli, M. (2024). *A New Control Strategy for Multifunctional PV Grid Interface Converter Considering Inverter Rating*. https://karafan.tvu.ac.ir/article_190992.html?lang=fa. (In Persian)

[26] Ahmadi, A., Minagar, S., Rezaei, B., & Malekzadeh, M. (2024). *Passivity-based Control of a Quadratic Boost Converter*. Karafan Journal,21(1), 133-153. https://karafan.tvu.ac.ir/article_193586.html. (In Persian)