



Robust Control of Integrated Reverse Osmosis Desalination System with Photovoltaic Power Supply

H. Darvishnezhad, M. Nazari*, M. Nazari, M. M. Shah Mardan

Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ABSTRACT: Among desalination systems, the use of reverse osmosis has become very widespread due to its advantages. One of the challenges in desalination systems especially in the reverse osmosis method is the existence of a control algorithm to overcome the uncertainties and disturbances. Another challenge of such systems is their power supply. A high-pressure pump supplies the pressure behind the membrane in the reverse osmosis system. The use of renewable energy not only does not have any environmental effects but also provides sustainable energy for such systems. In this paper, to answer these two challenges, at first, the integrated model of the reverse osmosis desalination system with the solar photovoltaic system has been examined; then for each part, a control algorithm is designed and simulated. An optimized fuzzy controller has been designed to track the maximum power point at different temperatures and radiation conditions in the photovoltaic solar system. The fuzzy controller has been optimized with the invasive weed optimization algorithm. The electric motor has been controlled using a fuzzy proportional–integral–derivative algorithm. The super-twisting sliding mode control has been used for the reverse osmosis system. The simulation results show that the proposed algorithm for the combined reverse osmosis-photovoltaic system has a good performance in different operating conditions and can remove and eliminate disturbances on the system.

Review History:

Received: May, 31, 2021

Revised: Nov. 01, 2021

Accepted: Dec. 20, 2021

Available Online: Jan. 10, 2022

Keywords:

Desalination

Reverse osmosis

Super-twisting sliding mode control

Photovoltaic solar system

Maximum power point tracking

Fuzzy control

1- Introduction

The desalination process, which refers to the process of separating a special part of a water-soluble salt, is divided into two main categories: membrane-based methods and evaporation-based methods [1, 2]. The Reverse Osmosis (RO) desalination system, despite its high maintenance cost, has advantages such as simplicity in design, easy operation, and low energy consumption [3]. Membranes with lower water pressure behind them also perform better [1, 4]. In desalination systems, energy consumption is a very important factor.

Reverse osmosis systems require electricity to start their electric motor. Therefore, in places that do not have access to electricity, it is practically impossible to use such systems. In many parts of the world, people will be forced to move to another place due to the lack of electricity. Also, agriculture will practically disappear in such areas. Now, if the energy of this system can be supplied from available renewable energies [5, 6], it not only provides energy but also does not lead to environmental pollution. The most available renewable energy in Iran is solar energy. Therefore, in this paper, the energy supply of the reverse osmosis system is the photovoltaic (PV) system [7]. There is a lot of research

on controlling the reverse osmosis system, but most of this research has focused on controlling the linear model of the reverse osmosis system. For example, the authors in [8, 9] have proposed an efficient closed-loop control strategy for industrial reverse osmosis desalination processes using traditional Proportional–Integral–Derivative (PID) controllers. In Ref. [10], a controller has been designed and implemented on the reverse osmosis desalination laboratory system using geometric control methods based on a nonlinear model. The disadvantage of this research is that it does not include the necessary elements for the reverse osmosis system such as power supply, pumping process, and some others like them. There has been little research in this area to study a system that simultaneously includes a power source, pumping system, and reverse osmosis membrane, as well as control of each element of the system [10, 11]. In the present study, in addition to using a new super twisting sliding mode control strategy for the reverse osmosis system, a fuzzy optimal controller is designed to track the maximum power point in the photovoltaic system, and a fuzzy-PID controller [12] to control the motor-pump subsystem. These cases have not been investigated yet.

*Corresponding author's email: nazari_mostafa@shahroodut.ac.ir



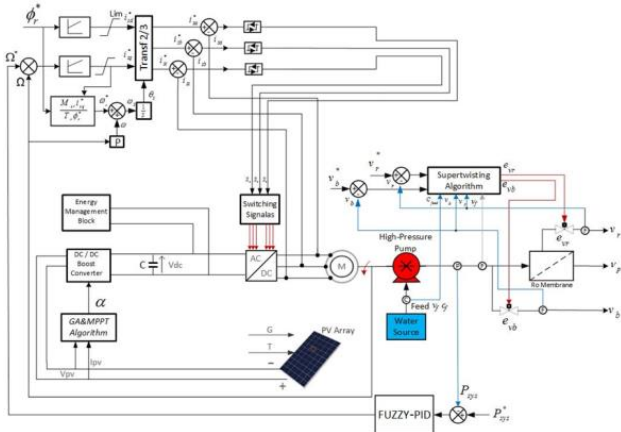


Fig. 1. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm

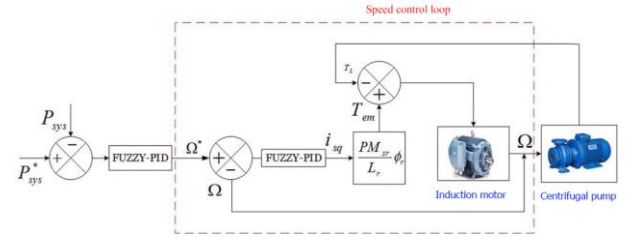


Fig. 2. Motor-pump set with fuzzy PID control algorithm

2- Components of Reverse Osmosis-Photovoltaic (RO-PV) Combined System

The system structure is shown in Fig. 1. In this configuration, we are looking for a system that can produce freshwater from various water sources using sustainable energy, so that it is economically and technically possible.

2- 1- The photovoltaic subsystem

The governing equations of the PV system are as follows:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + (R_s I_s)}{v_t \cdot \alpha} \right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + (R_s I_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$v_t = \frac{N_s K T}{q} \quad (2)$$

$$I_{ph} = \left(I_{phref} + (K_{isc} (T - T_{ref})) \right) \frac{G}{G_{ref}} \quad (3)$$

$$I_{ph} = I_{phref} \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{\alpha \cdot K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

$$I_{0ref} = \frac{I_{scref}}{\exp \left(\frac{V_{oscref}}{V_{tref} \cdot \alpha} \right) - 1} \quad (5)$$

2- 2- The RO subsystem

The governing equations of the RO system are as follows:

2- 3- Induction pump and motor subsystem

The speed loop control of the motor-pump sub-system is shown in Fig. 2.

The governing equations of the motor using Field-Oriented Control (FOC) are as follows:

$$\phi_{rd} = \phi_r \text{ and } \phi_{rq} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(- (R_s + \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r) i_{sd} + \sigma L_s \omega_s i_{sq} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \phi_r + V_{sd} \right) \quad (8)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(- \sigma L_s \omega_s i_{sq} - \left(R_s + \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r \right) i_{sq} - \frac{L_m}{L_r} \phi_r \omega_r + V_{sq} \right) \quad (9)$$

$$\frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \phi_r \quad (10)$$

3- Results and Discussion

In this paper, the reverse osmosis desalination system along with the solar photovoltaic system as an energy supplier is investigated. To maximum power tracking, an optimized fuzzy controller optimized with the Invasive Grass Algorithm (IGA) has been used.

A fuzzy-PID controller is used to control the motor speed as well as the pressure behind the membrane; and to control the discharges in the reverse osmosis system, the super twisting sliding mode control has been used. The implemented controllers can eliminate disturbances caused by temperature changes and water salinity changes. For this purpose, the controller performance was evaluated in salinities with 100%, 200%, and 300% increase (Fig. 3).

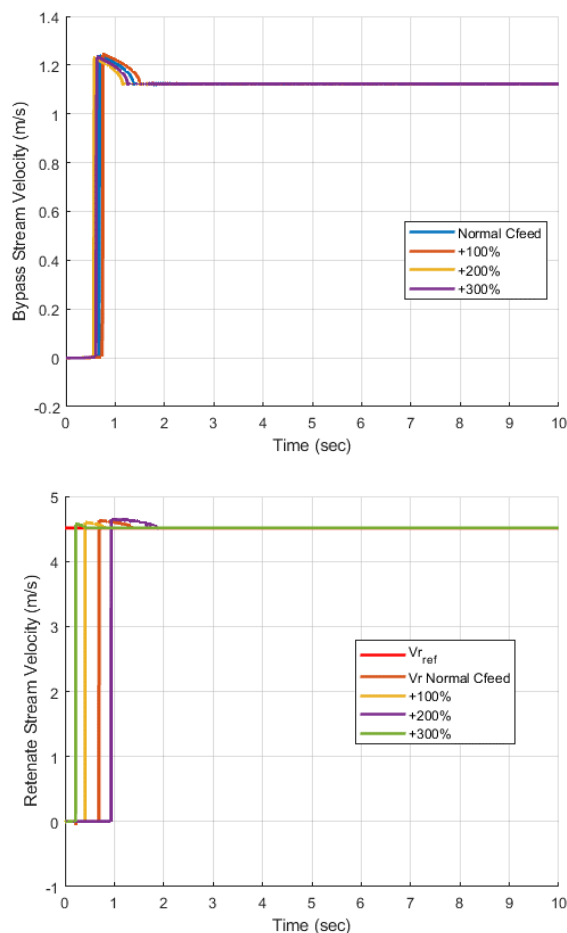


Fig. 3. The performance of the super twisting sliding model controller in dealing with disturbances in water salinity

4- Conclusion

In this paper, the combined photovoltaic-reverse osmosis (PV-RO) desalination system has been considered, and for each part of the system, a controller has been designed. The simulation results show that the proposed controllers not only perform well but also are robust in changing conditions such as inlet water concentration and rotor resistance. Therefore, the designed controllers can be used to build a reverse osmosis system with stable performance using renewable energy.

References

- [1] S. Sobana, R.C. Panda, Modeling and control of reverse osmosis desalination process using centralized and decentralized techniques, *Desalination*, 344 (2014) 243-251.
- [2] L.F. Greenlee, D.F. Lawler, B.D. Freeman, B. Marrot, P. Moulin, Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges, *Water research*, 43(9) (2009) 2317-2348.
- [3] T. Zhao, R. Niu, M. Su, T. Anderson, Steady state and dynamic modeling of RO desalination modules and system using EES, in: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2011, pp. 1-4.
- [4] Y.-Y. Lu, Y.-D. Hu, X.-L. Zhang, L.-Y. Wu, Q.-Z. Liu, Optimum design of reverse osmosis system under different feed concentration and product specification, *Journal of membrane science*, 287(2) (2007) 219-229.
- [5] H. Sharon, K. Reddy, A review of solar energy driven desalination technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41 (2015) 1080-1118.
- [6] A.M. Bilton, L.C. Kelley, S. Dubowsky, Photovoltaic reverse osmosis—Feasibility and a pathway to develop technology, *Desalination and Water Treatment*, 31(1-3) (2011) 24-34.
- [7] E. Tzen, R. Morris, Renewable energy sources for desalination, *Solar energy*, 75(5) (2003) 375-379.
- [8] I. Alatiqi, H. Ettouney, H. El-Dessouky, Process control in water desalination industry: an overview, *Desalination*, 126(1-3) (1999) 15-32.
- [9] I. Alatiqi, A. Ghabris, S. Ebrahim, System identification and control of reverse osmosis desalination, *Desalination*, 75 (1989) 119-140.
- [10] A.R. Bartman, P.D. Christofides, Y. Cohen, Nonlinear model-based control of an experimental reverse-osmosis water desalination system, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(13) (2009) 6126-6136.
- [11] M. Zebbar, Y. Messlem, A. Gouichiche, M. Tadjine, Super-twisting sliding mode control and robust loop shaping design of RO desalination process powered by PV generator, *Desalination*, 458 (2019) 122-135.
- [12] Z.-Y. Zhao, M. Tomizuka, S. Isaka, Fuzzy gain scheduling of PID controllers, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(5) (1993) 1392-1398.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Darvishnezhad, M. Nazari, M. Nazari, M. M. Shah Mardan, *Robust Control of Integrated Reverse Osmosis Desalination System with Photovoltaic Power Supply*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(3) (2022) 119-122.

DOI: 10.22060/mej.2022.20100.7168





کنترل مقاوم سیستم یکپارچه آب شیرین کن اسمز معکوس با منبع تغذیه فتوولتائیک

حسین درویشی نژاد، مصطفی نظری*، محسن نظری، محمد محسن شاه مردان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

کلمات کلیدی:

نمک‌زدایی

اسمز معکوس

کنترل مود لغزشی فرایچهشی

دستگاه خورشیدی فتوولتائیک

ردیابی بیشینه توان

کنترل فازی

خلاصه: از میان روش‌های نمک‌زدایی، استفاده از روش اسمز معکوس به دلیل مزایای آن بسیار گسترده شده است. یکی از چالش‌های پیش رو در واحدهای نمک‌زدایی با استفاده از روش اسمز معکوس، وجود یک الگوریتم کنترلی جهت غلبه بر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات وارده بر آن است. چالش دیگر چنین دستگاه‌هایی تأمین انرژی آن می‌باشد. فشار وارده بر غشاء توسط یک پمپ فشارقوی تأمین می‌شود که انرژی مکانیکی این پمپ توسط یک موتور الکتریکی تأمین می‌شود. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نه تنها اثرات زیست‌محیطی ندارد، بلکه موجب تأمین انرژی پایدار چنین دستگاه‌هایی می‌شود. در این مقاله، جهت پاسخ به این دو چالش، ابتدا مدل سیستم ترکیبی سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس به همراه سیستم خورشیدی فتوولتائیک مورد بررسی قرار می‌گیرد و برای هر بخش الگوریتم کنترلی مربوط به آن بخش طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. برای ردیابی بیشینه توان در شرایط دمایی و تابشی مختلف در سیستم خورشیدی فتوولتائیک، از کنترلر فازی بهینه‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های مهاجم استفاده شده است. برای کنترل موتور الکتریکی، الگوریتم فازی-پی‌آی‌دی طراحی شده است. برای کنترل سیستم اسمز معکوس از الگوریتم مود لغزشی فرایچهشی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی برای سیستم ترکیبی اسمز معکوس فتوولتائیک، دارای عملکرد مناسبی در شرایط کاری مختلف است و قابلیت رفع و حذف اغتشاشات وارده بر سیستم را دارد.

۱- مقدمه

فاکتورهای بسیار مهم می‌باشد، که حتی وجود این مانع در بعضی مواقع مانع از استفاده از چنین دستگاه‌هایی شده است. دستگاه‌های اسمز معکوس برای راه‌اندازی موتور الکتریکی آن نیاز به برق دارند. بنابراین، در مکان‌هایی که دسترسی به برق ندارند عملاً امکان استفاده از چنین دستگاه‌هایی از بین می‌رود. در حالی که در بسیاری از نقاط کشور علی‌رغم وجود آب‌های لب‌شور (آبی است که میزان نمک در آن از آب شیرین بیشتر و از آب دریا کم‌تر باشد)، به دلیل در دسترس نبودن برق، مردم مجبور به کوچ از آن منطقه خواهند شد. همچنین، عملاً کشاورزی در چنین مناطقی از بین خواهد رفت. حال اگر بتوان انرژی این سیستم را از انرژی‌های تجدیدپذیر قابل دسترس تأمین کرد [۷ و ۸] که علاوه بر تأمین انرژی منجر به آلودگی‌های زیست محیطی نشود، کمک شایانی به چنین مناطقی خواهد شد. در دسترس‌ترین انرژی تجدیدپذیر در کشور، انرژی خورشیدی است. بنابراین در این مقاله، تأمین انرژی سیستم اسمز معکوس با استفاده از دستگاه‌های فتوولتائیک خواهد بود. در حقیقت، انرژی خورشیدی پرمصرف‌ترین نوع انرژی است که تا حدود

روش‌های متنوعی برای فرآیند نمک‌زدایی از آب‌شور وجود دارد که هر یک مزایا و معایب مربوط به خود را دارند. فرآیند نمک‌زدایی، که به فرآیند جداسازی بخشی از نمک محلول در آب اطلاق می‌شود، به دو دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند: روش‌های غشائی و روش‌های مبتنی بر تبخیر [۱ و ۲]. در هر دو روش، آب‌شور ورودی به دو بخش آب شیرین و آب با شوری بیشتر تقسیم می‌شود. البته در بعضی مواقع، قبل از ورود آب به واحد نمک‌زدایی نیاز به واحدهای پیش تصفیه و پس از آن نیاز به واحد پس تصفیه می‌باشد [۳ و ۴]. سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس به‌رغم بالا بودن هزینه تعمیر و نگهداری آن، دارای مزایایی از جمله سادگی در طراحی، راه‌اندازی راحت و مصرف کم انرژی است [۵]. همچنین، با توسعه غشاهای استفاده از چنین دستگاه‌هایی در نمک‌زدایی فراگیرتر خواهد شد [۱ و ۶]. در مقایسه میان دستگاه‌های نمک‌زدایی، میزان مصرف انرژی از

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: nazari_mostafa@shahroodut.ac.ir

۵۷٪ بازار نمک‌زدایی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر را به خود اختصاص می‌دهد و بازاری است که در آن رایج‌ترین ترکیب فناوری‌ها استفاده از انرژی فوتوولتائیک همراه با نمک‌زدایی اسمز معکوس است [۳].

تحقیقات زیادی در ارتباط با کنترل فرآیند سیستم اسمز معکوس وجود دارند، اما اغلب این تحقیقات متمرکز بر کنترل مدل خطی سیستم اسمز معکوس بوده‌اند. به‌عنوان نمونه، العتیقی و همکاران [۹ و ۱۰]، نوعی راهبرد کنترل حلقه بسته کارآمد برای فرآیندهای نمک‌زدایی اسمز معکوس صنعتی که از کنترلرهای سنتی پی‌آی‌دی بهره برده است را پیشنهاد داده‌اند. در تحقیق هونگ بوی [۱۱]، نویسندگان کنترلر اچ‌بی‌نهایت را برای تنظیم سیستم اسمز معکوس خطی با استفاده از یک مدل خطی حول نقاط تعادل ارائه نمودند. علاوه بر طرح‌های کنترل خطی، شماری از مقالات به بحث و بررسی در مورد کنترل مدل غیرخطی سیستم اسمز معکوس پرداختند. در تحقیق مک‌فال و همکاران [۱۲]، نوعی کنترل پیش‌خور-پس‌خور ارائه شده است. در تحقیقات بارتمن و همکاران [۱۳]، نوعی کنترلر مبتنی بر مدل غیرخطی طراحی و بر روی سیستم آزمایشگاهی نمک‌زدایی اسمز معکوس با استفاده از روش‌های کنترل هندسی اجرا شده است. عیب این تحقیقات عبارت است از اینکه در آن‌ها عناصر لازم برای سیستم اسمز معکوس از قبیل تأمین توان، فرآیند پمپاژ و مانند آن‌ها لحاظ نشده است. تحقیقات انجام شده در این زمینه که در آن به مطالعه دستگاهی که هم‌زمان شامل منبع توان (نیرو)، سیستم پمپاژ و غشاء اسمز معکوس باشد و همچنین کنترل هر عنصر از این زنجیره مدنظر قرار گرفته باشد، بسیار کم است. تا جایی که مطالعه شده است، توسط بارتمن و همکاران [۱۳] و زبار و همکاران [۱۴]، چنین مواردی توأمان در نظر گرفته شده است. در تحقیق پیش‌رو، علاوه بر استفاده از راهبرد جدید کنترل مود لغزشی فرایپچشی برای سیستم اسمز معکوس، برای ردیابی بیشینه توان در سیستم خورشیدی از کنترل‌کننده بهینه‌فازی و برای کنترل زیر سیستم موتورپمپ از کنترل‌کننده فازی پی‌آی‌دی^۱ استفاده شده است که این موارد تاکنون بررسی نشده است.

با توجه به نکات گفته شده، در این مقاله زنجیره کامل سیستم خورشیدی فتوولتائیک، سیستم پمپ و موتور الکتریکی، و غشاء سیستم اسمز معکوس در یک زنجیره مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای ردیابی بیشینه توان سیستم خورشیدی فتوولتائیک در شرایط تابش و دمایی متفاوت از کنترل‌کننده فازی بهینه شده با الگوریتم علف‌های مهاجم استفاده می‌شود که در مقایسه با الگوریتم‌های کلاسیک مانند تپه نوردی، کارایی بسیار بهتری دارند. برای

کنترل سیستم پمپ از کنترل‌کننده فازی پی‌آی‌دی استفاده می‌شود [۱۵]. این کنترل‌کننده در مقایسه با کنترل کلاسیک فازی مقاوم‌تر بوده و عملکرد بهتری در دستگاه‌های غیرخطی دارد. برای تنظیم دبی‌ها در سیستم اسمز معکوس از روش کنترل مود لغزشی فرایپچشی استفاده می‌شود. هدف طرح کنترلی ارائه شده، دستیابی به عملکرد دینامیکی مناسب و تضمین مقاوم بودن در برابر نویز و نامعینی پارامترها است.

۲- اجزاء سیستم ترکیبی اسمز معکوس-فتوولتائیک

ساختار سیستم، در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، این سیستم شامل اجزاء زیر است:

- ۱- یک مولد خورشیدی فتوولتائیک به همراه بلوک مدیریت انرژی
- ۲- مبدل بوست جریان مستقیم-جریان مستقیم^۲ که با تنظیم چرخه وظیفه^۳ آن ردیابی بیشینه توان در شرایط تابشی و دمایی مختلف انجام می‌شود
- ۳- اینورتر سه فاز جریان متناوب-جریان مستقیم^۴
- ۴- مجموعه موتور القایی و پمپ گریز از مرکز
- ۵- غشاء اسمز معکوس

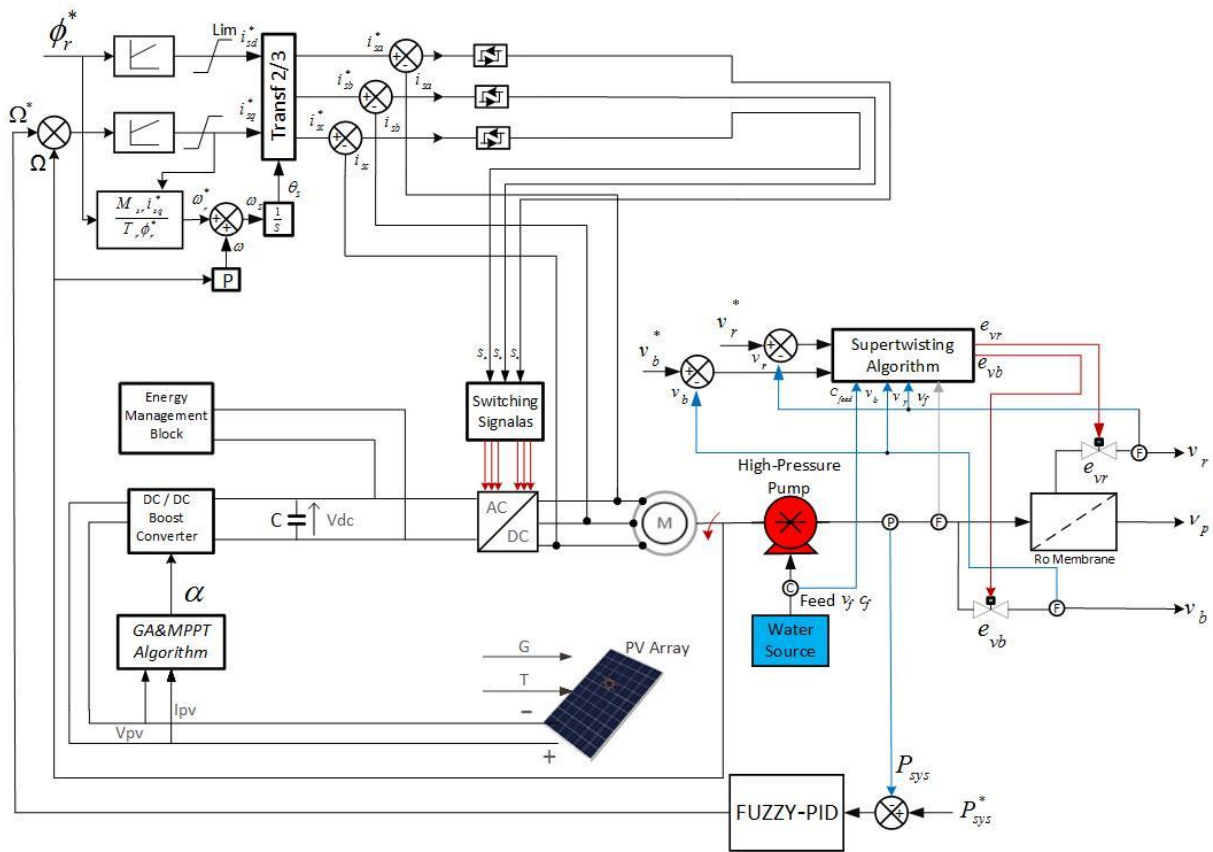
هدف در این پیکربندی تأمین انرژی پایدار، برای تولید آب شیرین از منابع مختلف آبی است، به‌طوری‌که از نظر اقتصادی و فنی نیز امکان‌پذیر باشد.

موتور القایی توسط استراتژی کنترل میدان^۵، کنترل می‌شود. برای حصول بیشینه توان در سیستم خورشیدی در برابر تغییر تابش و دما از یک مبدل بوست کنترل شده توسط کنترل‌کننده فازی بهینه شده با الگوریتم علف‌های مهاجم استفاده می‌گردد. اینورتر سه فاز، در خروجی موجی با فرکانس متغیر ایجاد می‌کند. انرژی مکانیکی توسط سیستم پمپ‌موتور به انرژی هیدرولیکی تبدیل شده و فشار مورد نیاز برای غشاء اسمز معکوس را فراهم می‌کند. سیستم مدیریت انرژی به‌منظور تضمین جریان برق پیوسته تحت شرایط مختلف آب و هوایی اضافه می‌شود که هدف اصلی آن تأمین توان مورد نیاز و اطمینان از عملکرد بی‌وقفه می‌باشد.

سیستم کنترلی در نظر گرفته شده دارای سه خروجی هست که دو مورد آن مربوط به میزان دبی‌های خروجی از غشاء اسمز معکوس است و دیگری فشار پشت غشاء می‌باشد. کنترل فشار با استفاده از کنترلر فازی پی‌آی‌دی

2 DC-DC
3 Duty cycle
4 AC-DC
5 Field Oriented Control (FOC)

1 Fuzzy-PID



شکل ۱. ترکیب سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس و سیستم فتوولتائیک

Fig. 1. The proposed RO desalination system

به طوری که:

$$v_t = \frac{N_s K T}{q} \quad (2)$$

$$I_{ph} = \left(I_{phref} + (K_{Isc} (T - T_{ref})) \right) \frac{G}{G_{ref}} \quad (3)$$

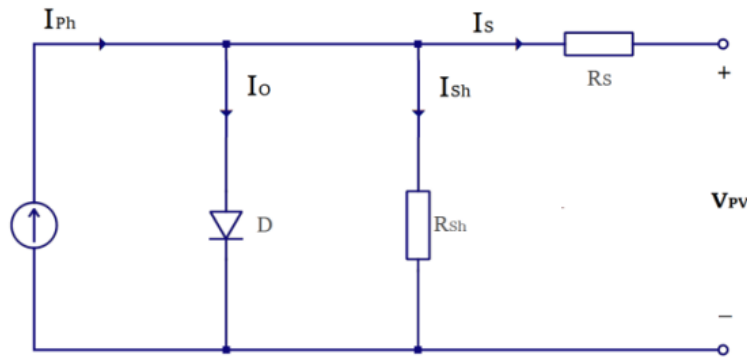
$$I_{ph} = I_{phref} \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \times \exp \left[\frac{q E_g}{\alpha K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

انجام می‌پذیرد، و دو خروجی دبی با استفاده از الگوریتم مود لغزشی فرایپچشی کنترل می‌شوند. در ادامه به تشریح بیشتر هریک از اجزاء می‌پردازیم.

۲-۱ سیستم خورشیدی فتوولتائیک

از سیستم خورشیدی برای تولید برق جهت تغذیه موتور القایی متصل به پمپ گریز استفاده می‌شود. چندین مدل ریاضی برای توصیف عملکرد ژنراتور فتوولتائیک ارائه شده است [۱۶-۱۸]. شکل ۲ مدار معادل سلول خورشیدی که به مدار تک دیود شناخته می‌شود را نشان می‌دهد [۱۹]. مشخصه جریان ولتاژ این مدل با معادلات زیر تعریف می‌شود [۲۰]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + (R_s I_s)}{v_t \alpha} \right) - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + (R_s I_s))}{R_{sh}} \quad (1)$$



شکل ۲. مدار معادل سلول خورشیدی

Fig. 2. Equivalent circuit of a solar cell

هدف در مسائل تعقیب توان بیشینه، اطمینان از برقرار بودن قضیه انتقال توان بیشینه در مدارهای الکتریکی می‌باشد. به‌طور خلاصه، این قضیه بیان می‌دارد که برای به‌دست آوردن بیشینه توان خروجی از یک منبع دارای مقاومت داخلی معین، باید مقاومت بار با مقاومت داخلی منبع برابر باشد که به این کار تطبیق امپدانس گویند. از آنجایی که جریان و ولتاژ تولیدی پیل شدیداً وابسته به شرایط محیطی است، در نتیجه به‌واسطه تغییرات ولتاژ و جریان تولیدی پیل، مقاومت داخلی پیل، مقاومت داخلی پیل (که همان منبع فرض شده است) دائماً در حال تغییر است. پس با فرض ثابت بودن مقاومت بار، مقاومت سمت تولیدکننده باید تنظیم گردد. یکی از روش‌های تطبیق امپدانس، استفاده از مبدل‌های توان است که به‌وسیله آن مقاومت دو سمت مصرف‌کننده و تولیدکننده برابر می‌گردد. در این مقاله از یک مبدل بوست افزایشده^۴ (مدار چپر) استفاده شده است. الگوریتم‌های مختلفی برای تنظیم چرخه کار وجود دارند که الگوریتم تپه نوردی یکی از مرسوم‌ترین روش‌های ردیابی بیشینه توان می‌باشد [۲۳ و ۲۴]. ولتاژ کار پانل با ورود کمی اختلال در هر تکرار تغییر می‌کند و سپس توان قبل و بعد از اختلال جهت تعیین جهت اختلال بعدی مقایسه می‌شود. اگر توان گرفته شده از آرایه فتوولتائیک افزایش یابد، اختلال در همان جهت باقی خواهد ماند. در غیر این صورت، اگر توان کاهش یابد، نقطه کار از ردیاب بیشینه توان فاصله گرفته و بنابراین اختلال جدید باید معکوس شود [۲۵ و ۲۶]. اما این روش، علاوه بر اینکه توانایی رسیدن به نقطه بیشینه را ندارد، زمان و مقدار نوسانات آن حول نقطه ردیاب بیشینه توان وابسته به میزان تغییرات چرخ وظیفه است. امروزه، استفاده از

$$I_{ph} = I_{phref} \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \times \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{\alpha \cdot K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5)$$

که I_0 و I_{pv} جریان‌های فتوولتائیک آرایه و جریان اشباع معکوس دیود می‌باشند. ولتاژ حرارتی آرایه‌ای با N_s سلول که به‌صورت سری متصل هستند، می‌باشد. T دمای محل اتصال p-n، q بار الکترون، K ثابت بولتزمن، α ضریب ایده آل بودن دیود، R_s مقاومت سری معادل آرایه و R_p مقاومت شنت معادل است. سایر پارامترهای سیستم خورشیدی در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- کنترلر ردیاب بیشینه توان^۱

ردیاب‌های بیشینه توان یک دستگاه الکترونیکی برای اتصال منبع تغذیه فتوولتائیک^۲ و بار^۳ هستند، که به سیستم امکان می‌دهد با بیشینه توان در شرایط کار متفاوت عمل کند. ردیاب بیشینه توان با یک مبدل حالت سوئیچ جریان مستقیم‌جریان مستقیم ساخته شده است که چرخه کار آن برای رسیدن به مقدار صحیح جریان تنظیم شده و بنابراین کارایی سیستم را به بیشینه می‌رساند [۲۱-۲۳].

- 1 Maximum Power Point Tracking (MPPT)
- 2 Photovoltaic (PV)
- 3 Load

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(-\sigma L_s \omega_s i_{sq} - \left(R_s + \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right) R_r \right) i_{sq} - \left(\frac{L_m}{L_r} \phi_r \omega_r + V_{sq} \right) \quad (۸)$$

$$\frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \phi_r \quad (۹)$$

$$Tem = \frac{pL_m}{Lr} i_{sq} \phi_r \quad (۱۰)$$

که $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ ضریب نشت می‌باشد. کنترل برداری موتور القایی به ما این امکان را می‌دهد که شار و گشتاور را به صورت مجزا با کنترل جریان‌های متناظر i_{sd} و i_{sq} تنظیم کرد. در فرآیند طراحی کنترل کننده فشار (زیربخش ۳-۲)، بار به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود. برای مقاوم بودن کنترل کننده و همچنین در نظر گرفتن اثرات غیرخطی در مدل، از کنترل کننده فازی پی‌آی دی استفاده شده است [۱۴ و ۱۵].

۲-۴- مجموعه پمپ و موتور القایی

سیستم اسمز معکوس متشکل از یک پمپ فشارقوی، دو شیر کنترلی، و یک غشاء می‌باشد و فاقد واحدهای پیش تصفیه یا پس تصفیه است. آن گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، تغذیه سیستم، آب تحت فشار بوده و از طریق یک پمپ فشارقوی به سمت بخش غشاء ارسال می‌گردد. جریان تحت فشار به دو قسمت تقسیم می‌شود که یک بخش آن با سرعت به بخش بای‌پس و جریان دیگر وارد غشاء می‌شود. جریان مذکور نیز به یک جریان با درجه شوری پایین و یک جریان غلیظ با سرعت جداسازی می‌شوند. همه جریان‌های خروجی با فشار اتمسفر تخلیه می‌شوند [۱۱ و ۳۱].

سیستم دینامیکی اسمز معکوس با استفاده از ترازهای انرژی و جرم مدل سازی شده‌اند. استخراج مدل، منتج به دو معادله دیفرانسیل معمولی غیرخطی^۲ می‌گردد [۳۱ و ۳۲] که می‌تواند فرآیند تشریح شده در شکل ۷ را

کنترل کننده‌های فازی بهینه شده با الگوریتم‌های فرا ابتکاری بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها عملکرد بسیار مناسب تری در مقایسه با روش‌های کلاسیک مانند تپه نوردی دارند. در این مقاله از کنترل کننده فازی بهینه شده با الگوریتم علف‌های مهاجم برای رسیدن به نقطه توان بیشینه در شرایط تابشی و دمایی مختلف استفاده می‌شود.

۲-۳- مجموعه پمپ و موتور القایی

استفاده از پمپ‌های گریز از مرکز در صنعت، بسیار متداول می‌باشد که می‌توان به صنعت تصفیه آب اشاره نمود. پمپ‌های گریز از مرکز سرعت متغیر، به دلیل سادگی و قابل اطمینان بودن، به طور گسترده در دستگاه‌های آب شیرین کن مورد استفاده قرار می‌گیرند. آن‌ها انرژی مکانیکی دریافتی از موتور القایی را به انرژی مکانیکی در آب تبدیل می‌کنند. از آن‌ها برای تبدیل سرعت چرخش موتور القایی به یک نرخ جریان آب فشار بالا استفاده می‌شود.

موتور القایی برای حرکت پمپ فشارقوی بکار می‌رود، که آب دریا یا آب لبشور را برای واحد اسمز معکوس تأمین می‌کند. به طور کلی، درایو موتور القایی بر مبنای کنترل اسکالر [۲۷]، کنترل میدانی و کنترل لغزش می‌باشد [۲۸]. کنترل موتور القایی با کارایی بالا را می‌توان به کمک روش‌های کنترل میدان به دست آورد [۲۹]. با این حال، این روش‌ها مستلزم اندازه‌گیری سرعت روتور می‌باشند. این کنترل با جهت‌دهی شار بر روی محور d (که به عنوان محور مستقیم نیز شناخته می‌شود، محوری است که توسط آن شار توسط سیم پیچ میدان تولید می‌شود) تحقق می‌یابد که به صورت زیر بیان می‌شود [۳۰]:

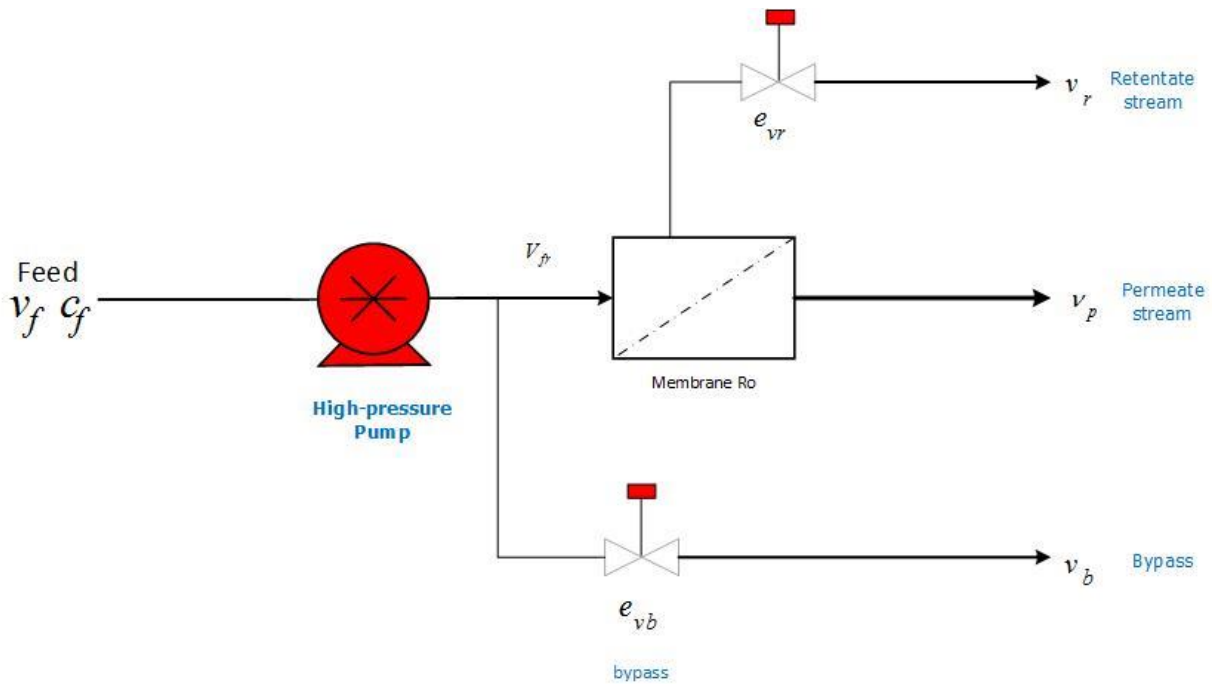
$$\phi_{rd} = \phi_r \text{ and } \phi_{rq} = 0 \quad (۶)$$

با جهت‌گیری میدان، معادلات دینامیکی اجزای جریان استاتور، شار روتور و گشتاور الکترومغناطیس به کمک روابط زیر تعیین می‌شوند [۳۰]:

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(- \left(R_s + \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r \right) i_{sd} + \sigma L_s \omega_s i_{sq} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \phi_r + V_{sd} \right) \quad (۷)$$

1 Fuzzy-PID

2 Ordinary Differential Equation (ODE)



شکل ۳. طرح شماتیک فرآیند نمک‌زدایی در سیستم اسمز معکوس

Fig. 3. Schematic of the RO desalination process

سوپاپ مایع غلیظ، سوپاپ مقاومت سوپاپ جریان بای‌پس، v_f سرعت تغذیه، و $\Delta\pi$ فشار اسمزی است. سرعت جریان آب با شوری کم (v_p) و فشار سیستم (P_{sys}) به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۳]:

$$v_p = \frac{A_m + k_m}{\rho A_p} (P_{sys} - \Delta\pi) \quad (12)$$

$$P_{sys} = \frac{\rho A_p}{A_m + k_m} (v_f - v_b - v_r) + \Delta\pi \quad (13)$$

آنگاه، فشار اسمزی نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$\Delta\pi = \delta C_{eff} (T + 273) \quad (14)$$

به صورت زیر تشریح نماید:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d_{v_b}}{dt} &= \frac{A_p^2}{A_m k_m v} (v_f - v_b - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta\pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vb} v_b^2}{V} \\ \frac{d_{v_r}}{dt} &= \frac{A_p^2}{A_m k_m v} (v_f - v_b - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta\pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vr} v_r^2}{V} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

سرعت جریان بای‌پس (v_b) و سرعت مایع غلیظ (v_r) متغیرهای حالت سیستم می‌باشند. V مجموع حجم داخلی، A_p مساحت غشاء، k_m ضریب مجموع انتقال جرم در غشاء، ρ چگالی سیال، e_{vr} مقاومت

جدول ۱. پایگاه قواعد فازی

Table 1. Fuzzy rule-base

E	N	Z	P
CE			
N	M	S	S
Z	S	M	B
P	B	M	M

به طوری که:

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ g_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \left(\frac{A_p v_b^2}{V} \right) \\ -\frac{1}{2} \left(\frac{A_p v_r^2}{V} \right) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$C_{eff} = C_{feed} (\alpha + (1-\alpha)) \times \left(\frac{(1-R) + R(v_f - v_b)}{v_r} \right) \quad (15)$$

۳- الگوریتم کنترلی

یک سیستم کنترل فرآیند مقاوم^۲ جهت کارایی مناسب سیستم اسمز معکوس ضروری می‌باشد. برای این منظور، الگوریتم کنترل برای بهبود عملکرد سیستم با توجه به انتقال نقاط کاری موردنظر و با توجه به تغییر کیفیت آب تغذیه به منظور امکان عملکرد ایمن و قابل اطمینان سیستم اسمز معکوس طراحی شده است.

با استفاده از معادلات دینامیکی که در بالا ذکر شد، تکنیک‌های کنترلی مختلف را می‌توان با استفاده از مقادیر مقاومت سوپاپ به عنوان ورودی‌های کنترلی (e_{vr}, e_{vb}) بکار برد. همان‌طور که بیان شد، خروجی‌ها در این سیستم سرعت سیال در خطوط بای‌پس (v_b) و آب غلیظ (v_r) و فشار سیستم می‌باشند.

۳-۱- کنترل‌کننده ردیاب توان بیشینه

برای این منظور از کنترل‌کننده فازی بهینه شده با استفاده از الگوریتم علف‌های مهاجم استفاده می‌شود. ورودی به کنترل‌کننده فازی، شیب نمودار توان‌ولتاژ و تغییرات آن است و خروجی سیستم فازی مقدار چرخه وظیفه. برای هر ورودی و خروجی سه تابع عضویت تعریف شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

قواعد فازی پس از بهینه‌سازی در جدول ۱ بیان شده‌اند. مشاهده می‌شود که قواعد استخراج شده با منطق فیزیکی سیستم همخوانی دارد.

که در آن C_{feed} مقدار کل جامدات حل شده^۱ در آب تغذیه، δ ثابت ربط دهنده غلظت مؤثر به فشار اسمزی، a ضریب وزن دهی غلظت مؤثر، R دفع نمک حداقلی در غشاء و T دمای فرآیند هستند. فرم فضای حالت برای طراحی کنترلی‌کننده مود لغزشی برای سیستم اسمز معکوس، به صورت زیر است [۱۴]:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (16)$$

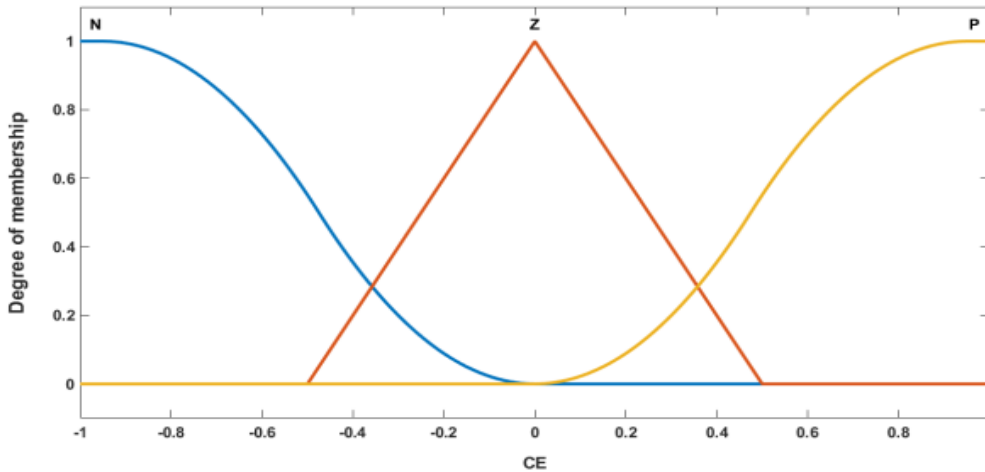
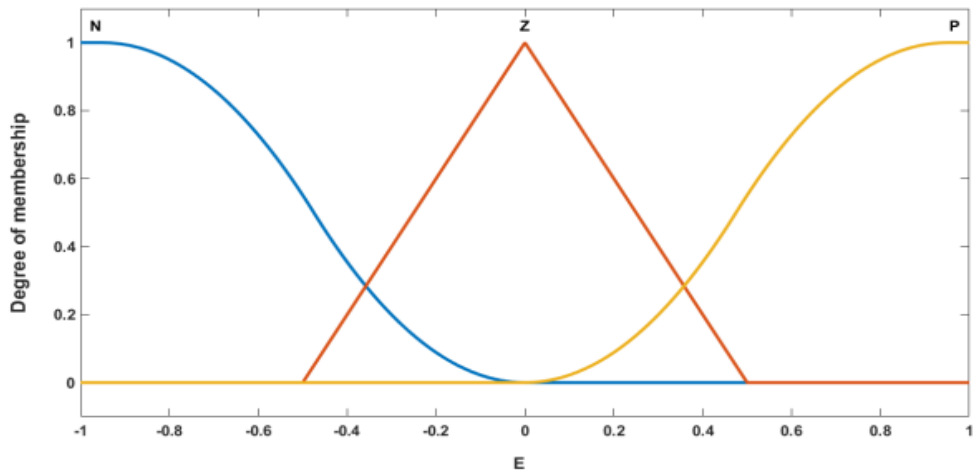
که در آن:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_b \\ v_r \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{vb} \\ e_{vr} \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} v_b \\ v_r \\ P_{sys} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p_{sys} A_p}{\rho V} \\ \frac{p_{sys} A_p}{\rho V} \end{bmatrix} \quad (18)$$

2 Robust process control system

1 Total Dissolved Solids (TDS)



شکل ۴. توابع عضویت مربوط به متغیرهای ورودی

Fig. 4. Membership functions related to input variables

فازی پی‌آی‌دی برای کنترل دور موتور و کنترل فشار سیستم استفاده شده است. در کنترل دور موتور القایی، بار وارده از سمت پمپ (T_L)، به‌عنوان اغتشاش در سیستم کنترلی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مقاوم بودن کنترل‌کننده فازی پی‌آی‌دی، سیستم حلقه بسته دارای عملکرد مناسب می‌باشد.

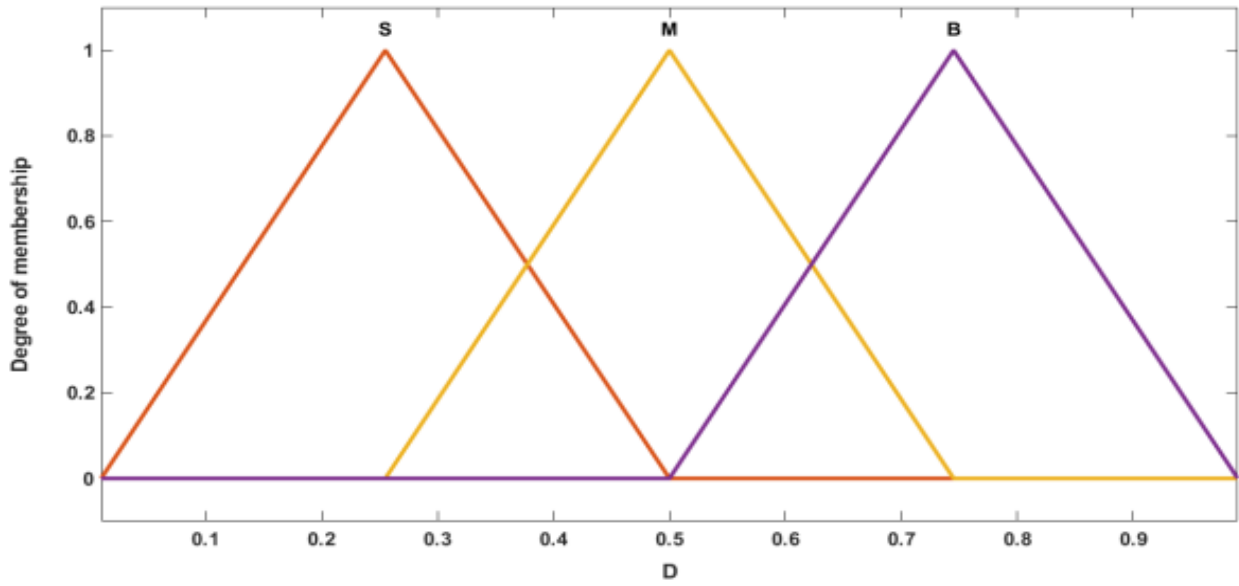
۳-۳- کنترل سیستم اسمز معکوس

سیستم ارائه شده در این مقاله از یک نرخ جریان تغذیه ثابت استفاده

در این سیستم فازی از تی‌نرم ماکزیمم، اس‌نرم مینیمم و موتور استنتاج ضرب استفاده شده است. فازی‌ساز، سینگلتون می‌باشد و غیرفازی‌ساز میانگین مراکز است.

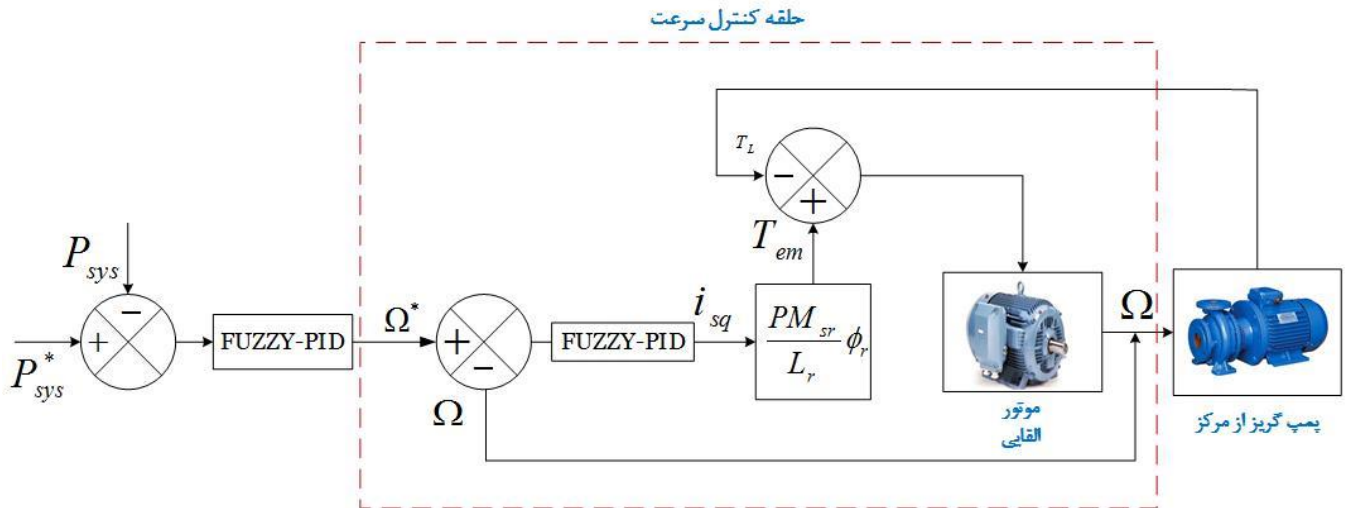
۳-۲- کنترل‌کننده ردیاب توان بیشینه

کنترل فشار، کلید عملکرد سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس است. حلقه کنترلی مربوط به مجموعه موتور-پمپ در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، از دو کنترل‌کننده



شکل ۵. توابع عضویت مربوط به متغیر خروجی

Fig. 5. Membership functions related to output variables



شکل ۶. مجموعه موتور-پمپ به همراه الگوریتم کنترلی PID فازی

Fig. 6. Speed control loop block diagram

لغزشی تحت شرایط ایده آل حرکت کند و این جملات پاسخ سیستم را تسریع می‌سازند و خطای حالت پایدار را کاهش می‌دهند [۳۷]. جملات کنترل معادل با قرار دادن $\dot{S} = 0$ محاسبه می‌شوند:

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}_b - \dot{v}_{b \text{ ref}} \\ \dot{v}_r - \dot{v}_{r \text{ ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$U_{eq} = \begin{bmatrix} u_{1eq} \\ u_{2eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{v}_{b \text{ ref}} V - \frac{A_p^2}{A_m K_m} (v_f - v_b - v_r) - \frac{A_p}{\rho} \Delta \pi}{-0.5 A_p v_b^2} \\ \frac{\dot{v}_{r \text{ ref}} V - \frac{A_p^2}{A_m K_m} (v_f - v_b - v_r) - \frac{A_p}{\rho} \Delta \pi}{-0.5 A_p v_r^2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

و بنابراین خواهیم داشت:

$$U = \begin{bmatrix} \left(\frac{\dot{v}_{b \text{ ref}} V - \frac{A_p^2}{A_m K_m} (v_f - v_b - v_r) - \frac{A_p}{\rho} \Delta \pi}{-0.5 A_p v_b^2} \right) + \left(k_{11} |s_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s_1) + k_{12} \int \text{sign}(s_1) dt \right) \\ \left(\frac{\dot{v}_{r \text{ ref}} V - \frac{A_p^2}{A_m K_m} (v_f - v_b - v_r) - \frac{A_p}{\rho} \Delta \pi}{-0.5 A_p v_r^2} \right) + \left(k_{21} |s_2|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s_2) + k_{22} \int \text{sign}(s_2) dt \right) \end{bmatrix} \quad (24)$$

با انتخاب این ورودی، خطاهای ردیابی به صورت مجانبی به سمت صفر خواهند رفت.

۴- نتایج و بحث

برای نشان داده عملکرد الگوریتم‌های کنترلی ارائه شده، شبیه‌سازی در شرایط مختلف کاری در نرم‌افزار متلب انجام شده است. مقادیر پارامترهای سیستم در جدول ۲ آورده شده است [۱۴].

می‌کند، اما از یک جریان بای‌پس جداگانه با یک سوپاپ فعال برای کنترل سرعت جریان تغذیه آب به واحد غشاء استفاده می‌شود. از کنترلر مود لغزشی فرایچه‌چی برای تنظیم جریان بای‌پس و سرعت جریان غلیظ (نرخ جریان) استفاده می‌شود که این امر با استفاده از سوپاپ بای‌پس و سوپاپ جریان غلیظ به‌عنوان ورودی‌های کنترلی (e_{vb} ، e_{vr})، انجام می‌شود.

الگوریتم فرایچه‌چی یک کنترل‌کننده حالت لغزشی مرتبه دوم است [۳۳ و ۳۴] که برای دستگاه‌های با درجه نسبی یک کاربرد می‌باشد. درجه نسبی، تعداد دفعاتی است که مشتق سیگنال خروجی قبل از نمایش ورودی مورد نیاز است. مزیت این الگوریتم این است که به اطلاعات مشتق زمانی متغیرهای لغزشی نیاز ندارد و به‌طور معناداری پدیده لرزش موجود در کنترل حالت لغزشی مرتبه اول را کاهش می‌دهد [۳۷-۳۵]. این الگوریتم، قانون کنترل را به‌صورت ترکیب دو جمله، یعنی تابع پیوسته متغیر لغزشی و انتگرال تابع ناپیوسته متغیر لغزشی تعریف می‌کند [۳۷ و ۳۸]. توجه کنید که به این دلیل این الگوریتم را انتخاب شده است که درجه نسبی سیستم [۱،۱] است. بنابراین، سرعت پاسخ این الگوریتم باید سریع باشد، که خاصیت اساسی کنترلر مود لغزشی فرایچه‌چی است (همگرایی زمان محدود) [۳۸]. قانون کنترل $u = [u_1 u_2]^T$ برای هدایت سیستم به سطح مورد نظر $S = [s_1 s_2]^T$ طراحی می‌شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_b - v_{b \text{ ref}} \\ v_r - v_{r \text{ ref}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

که S سطح لغزشی سرعت جریان بای‌پس و سرعت جریان مواد نگهداری است. طبق این الگوریتم، ورودی کنترلی به‌صورت $U = U_{eq} + U_n$ تعریف می‌شود، به‌طوری‌که:

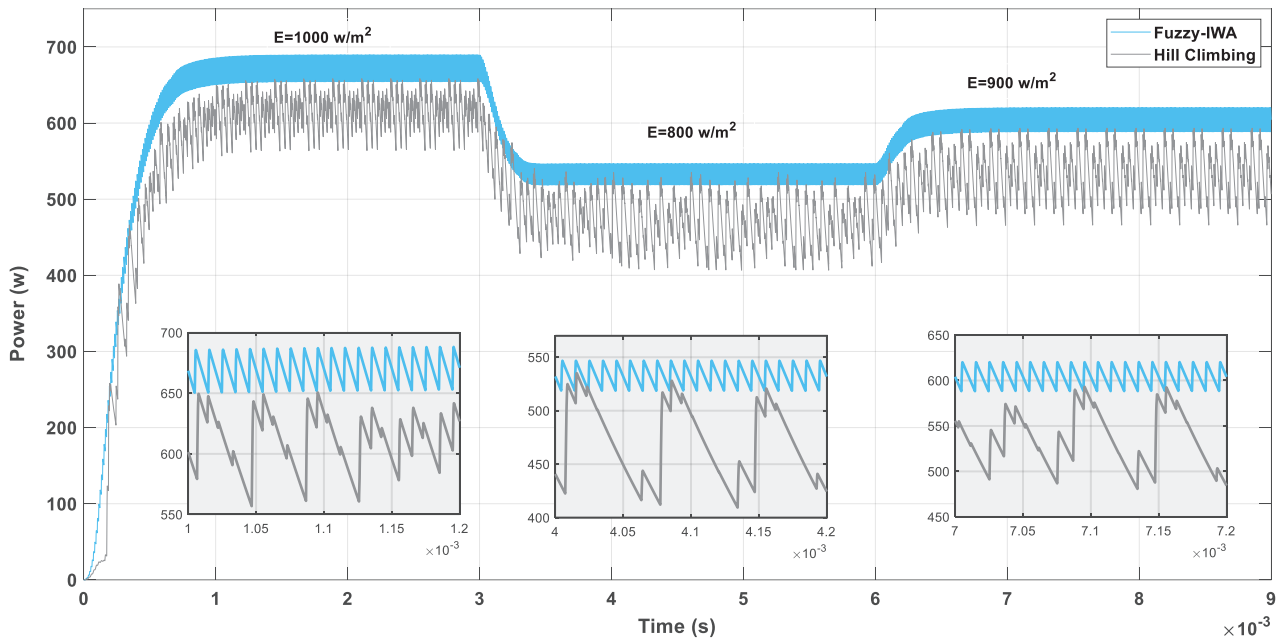
$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1eq} + u_{1n} \\ u_{2eq} + u_{2n} \end{bmatrix} \quad (21)$$

در این رابطه، U_n جمله کنترل سوئیچینگ است. این جمله سبب می‌شود سیستم در حالت اولیه به مانیفولد لغزشی زمان متناهی برسد که از طریق کاربرد الگوریتم فرایچه‌چی محاسبه می‌شود؛ و U_{eq} جمله کنترل معادل است. این جمله به سیستم این امکان را می‌دهد که در امتداد مانیفولد

جدول ۲. مقدار پارامترهای سیستم برای شبیه‌سازی [۱۴]

Table 2. The value of system parameters for simulation

مقدار	واحد	نماد	
مولد فتوولتائیک			
۷/۶۱	A	I_{mp}	حداکثر جریان برق
۲۰۰/۱۴۳	W	P_{max}	حداکثر توان
۸/۲۱	A	I_{sc}	جریان مدار کوتاه
۳۲/۹	V	V_{oc}	ولتاژ مدار باز
۵۴		N_s	تعداد سلول‌های متصل بصورت سری
۴		N_p	تعداد سلول‌های متصل بصورت موازی
پارامترهای موتور القایی			
۷۵۰	W	P	توان حقیقی
۱۱/۳۰۸۵	Ω	R_s	مقاومت فاز استاتور
۱۱/۸	Ω	R_r	مقاومت فاز روتور
۰/۵۵۷۸	H	L_s	القاه فاز استاتور
۰/۶۱۵۲	H	L_r	القاه فاز روتور
۰/۵۵۷۸	H	L_m	القاه مغناطیسی
۰/۰۰۲	kg.m ^۲	J	لحظه اینرسی
۳/۱۱۶۵×۱۰ ^{-۴}	Nm/ rad/s	f	میرایی
۱		P	تعداد جفت قطب‌ها
پارامترهای پمپ گریز از مرکز			
۳۰	m ^۳ / h	Q_{max}	حداکثر سرعت جریان پمپ
۸۰	m	H	ارتفاع کل پمپ
۲۹۰۰	r/ min	N	تعداد دور
پارامترهای فرایند اسمز معکوس			
۱۰۰	kg/ m ^۳	ρ	چگالی سیال
۰/۰۴	m ^۳	V	مجموع حجم داخلی
۱/۲۷	cm ^۲	A_p	مساحت ممبران
۳۰	m ^۲	A_m	سطح فعال غشاء
۹/۲۱۸×۱۰ ^{-۹}	s/ m	k_m	ضریب مجموع انتقال جرم درغشاء
۰/۵		α	ضریب وزن دهی - غلظت مؤثر
۲۵	°C	T	دمای فرایند
۰/۹۹۳		R	دفع نمک حداقلی درغشا
۰/۲۶۴۱		δ	ثابت ربط دهنده غلظت مؤثر به فشار اسمزی



شکل ۷. عملکرد سیستم کنترل فازی بهینه‌شده در ردیابی توان بیشینه در شرایط تابش مختلف

Fig. 7. Performance of optimized fuzzy control system in tracking maximum power in different radiation conditions

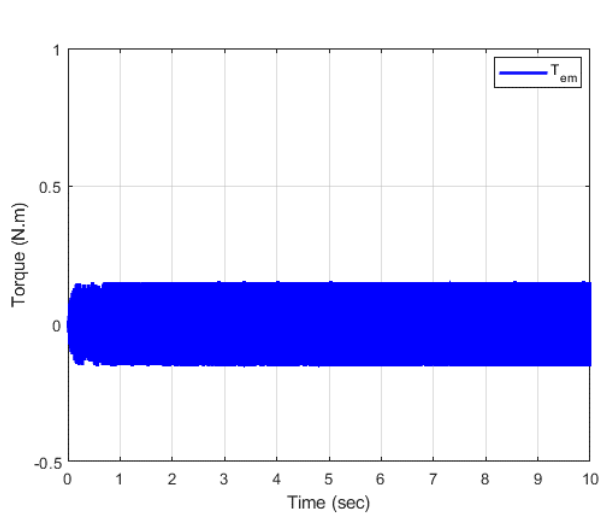
همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، موتور الکتریکی توانسته است با سرعت خود، فشار موردنظر سیستم را تنظیم کند. سرعت جریان تغذیه برابر با ۱۰ متر بر ثانیه شده است (شکل ۹). همان‌طور که مشاهده می‌شود، دبی ورودی به غشاء وابسته به سرعت موتور القایی است. سرعت جریان بای‌پس و سرعت جریان آب‌شور 1.23 m/s و $4/511 \text{ m/s}$ تنظیم شد. شکل ۱۰-ب و ۱۰-ج اثربخشی کنترلر پیشنهادی را نشان می‌دهد که در آن سرعت جریان بای‌پس و سرعت جریان آب‌شور به اندازه کافی سریع هستند. مشاهده می‌شود که کنترلر حالت لغزشی فرایچشی به ردیابی عالی متغیرهای کنترل با زمان پاسخ کم می‌رسد.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که فشار سیستم در ابتدا کمی از مقدار مطلوب آن انحراف می‌یابد، سپس با دینامیک خوبی به مقدار مبنای آن می‌رسد، که کارایی مقاوم کنترل‌کننده فازی پی‌آی‌دی را نشان می‌دهد.

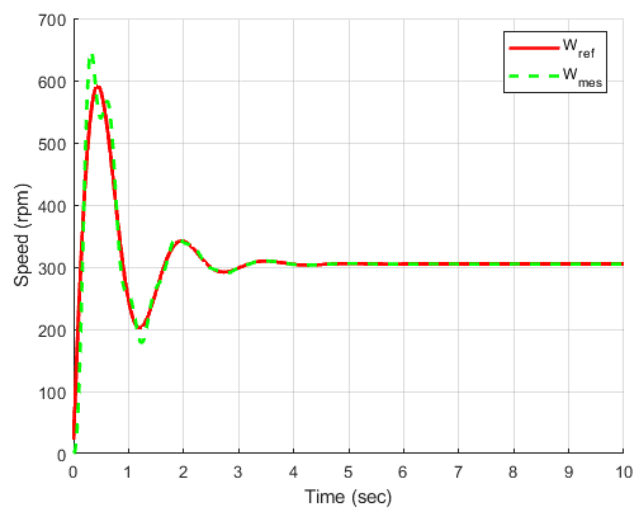
برای بررسی مقاوم بودن کنترلر ارائه شده، عملکرد کنترل‌کننده را در شوری‌های مختلف آب ورودی مورد بررسی قرار می‌دهیم. در شکل ۱۱-الف و ۱۱-ب مشاهده می‌شود که پاسخ‌های سرعت جریان بای‌پس و سرعت جریان آب‌شور به اندازه کافی سریع بوده و به مقادیر دلخواه و خطاهای

شکل ۷، عملکرد کنترل فازی ارائه شده جهت ردیابی توان بیشینه در شرایط تابش مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، عملکرد سیستم فازی بهینه شده با الگوریتم غلف‌های مهاجم به مراتب بهتر از عملکرد الگوریتم تپه نوردی می‌باشد. کنترلر بهینه‌شده فازی نه تنها سریع‌تر به مقدار بیشینه خود می‌رسد، بلکه دریافتن توان بیشینه نیز موفق‌تر می‌باشد. در این شبیه‌سازی دمای محیط 25°C فرض شده است. عملکرد کنترلر فازی پی‌آی‌دی ارائه شده برای کنترل سرعت موتور الکتریکی و همچنین فشار سیستم در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، کنترلر توانسته است سرعت مرجع اعمال شده توسط حلقه فشار را به خوبی دنبال کند (شکل ۸-الف) که نشان‌دهنده عملکرد مناسب حلقه کنترل سرعت است. گشتاور موتور القایی در شکل ۸-ب نشان داده شده است. همچنین، جریان مستقیم استاتور و شار در شکل ۸-ج و ۸-د نشان داده شده است که به خوبی توانسته‌اند مقادیر مطلوب را ردیابی کنند. نمودار شار به خوبی مجزا بودن دینامیک شارها را تأیید می‌کند.

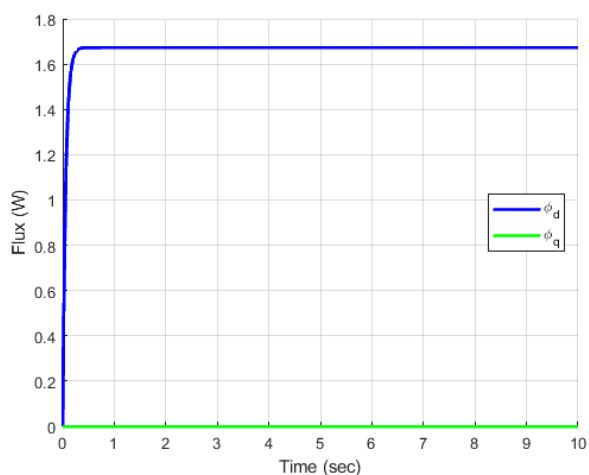
فشار مرجع $P_{\text{sys}} = 457/51 \text{ psi}$ در نظر گرفته شده است [۱۴].



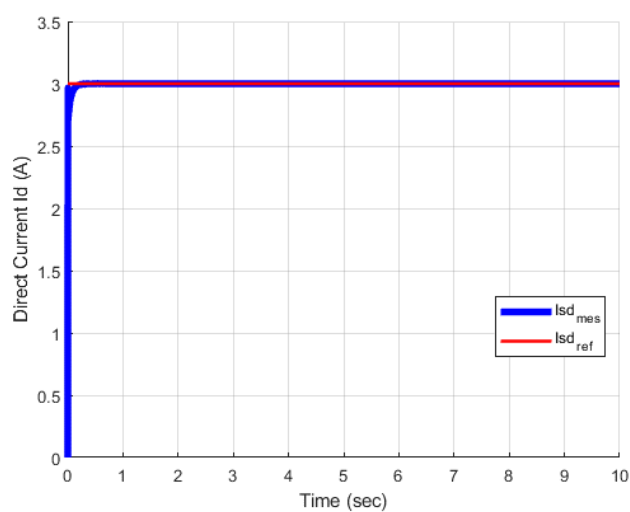
(ب)



(الف)



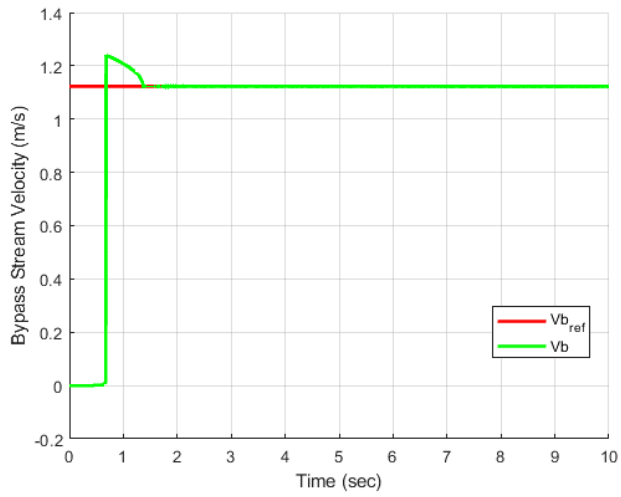
(د)



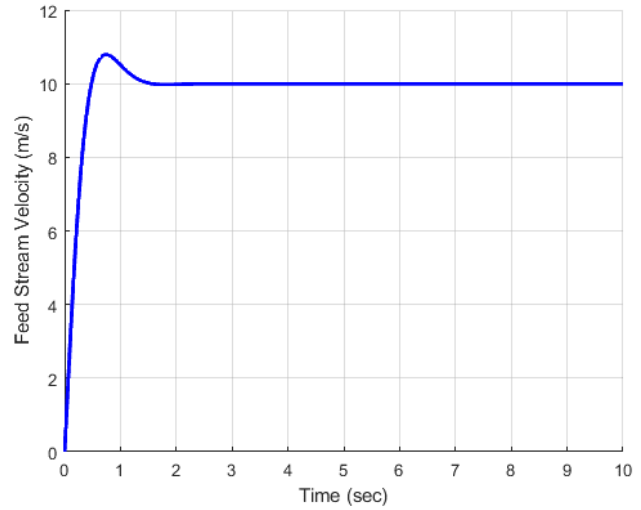
(ج)

شکل ۸. الف) سرعت درایو فرکانس متغیر؛ ب) پاسخ گشتاور مقاومتی و گشتاور الکترومغناطیسی؛ ج) پاسخ جریان مستقیم؛ د) پاسخ شارهای روتور

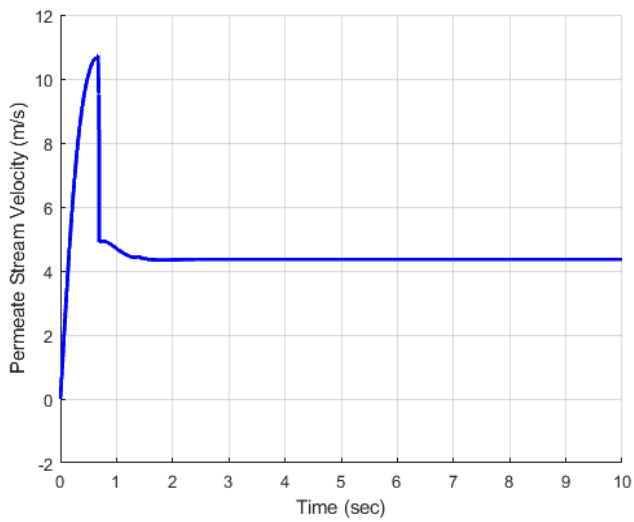
Fig. 8. (a) Variable frequency drive speed, (b) Resistance torque response and electromagnetic torque, (c) Direct current response, (d) Rotor flux response



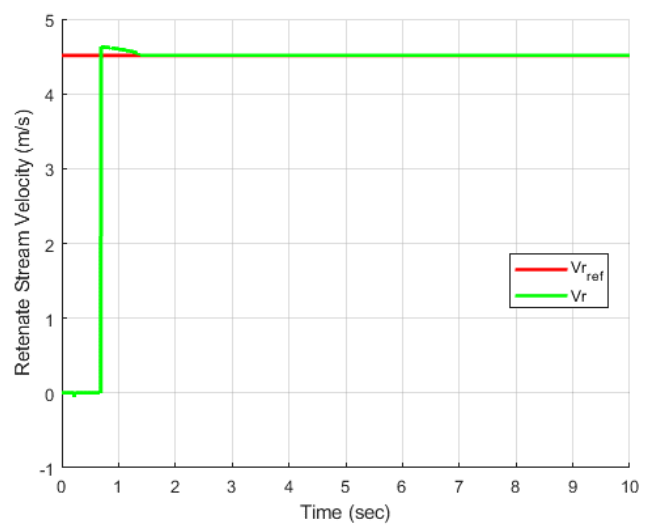
(ب)



(الف)



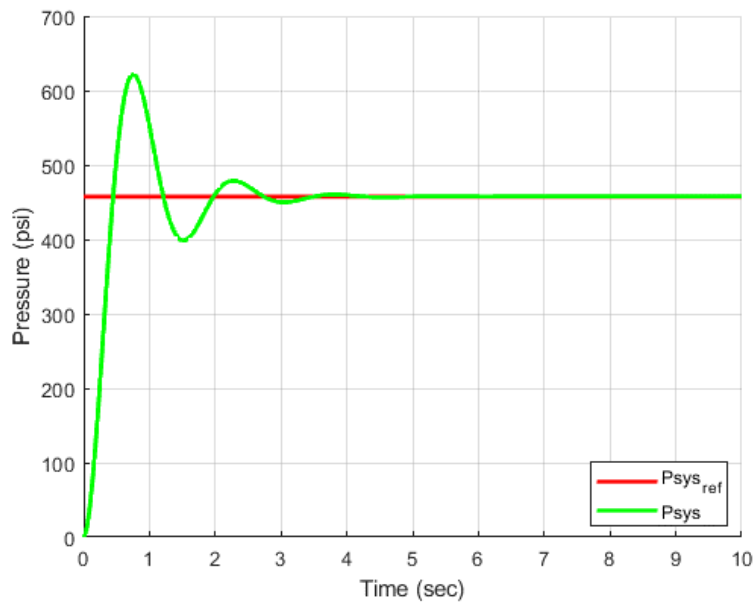
(د)



(ج)

شکل ۹. (الف) نمودار سرعت جریان تغذیه (v_f)؛ (ب) سرعت جریان بای پس (v_b)؛ (ج) سرعت جریان آب شور (v_r)؛ (د) سرعت جریان آب کم نمک (v_p)

Fig. 9. (a) Feeding flow rate diagram (v_f), (b) bypass stream velocity (v_b), (c) Saline water flow rate (v_r), (d) Low-salt water flow velocity (v_p).



شکل ۱۰. تغییرات فشار سیستم

Fig. 10. System pressure response

شبه‌سازی به‌منظور بررسی عملکرد کنترلر میدانی بررسی می‌شود. فرض می‌شود مقاومت روتور تا ۵۰٪ در زمان $t = 5S$ تغییر می‌کند، سپس به ۱۰٪ در زمان $t = 10S$ از مقدار اسمی آن می‌رسد (شکل ۱۲).

شکل ۱۳-الف و ۱۳-ب نشان می‌دهند که سرعت به خوبی مقدار مینا را با دینامیک خوب ردیابی می‌کند و گشتاور الکترومغناطیسی علی‌رغم تغییرات مقاومت روتور ثابت می‌ماند. شکل ۱۳-ج نشان می‌دهد که جریان مستقیم استاتور مقدار مینا را حتی با تغییر در مقدار مقاومت روتور ردیابی می‌کند. رفتار شار روتور مستقیم و درجه دوم در شکل ۱۳-د نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حتی با افزایش مقاومت روتور، شار روتور مستقیم مقدار ثابت خود را حفظ می‌کند و شار درجه دوم روتور صفر باقی می‌ماند. متوجه می‌شویم که عملکردهای رضایت‌بخش تحت تغییرات مقاومت روتور حاصل می‌شود و کنترل بردار ردیابی عملکرد خوبی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

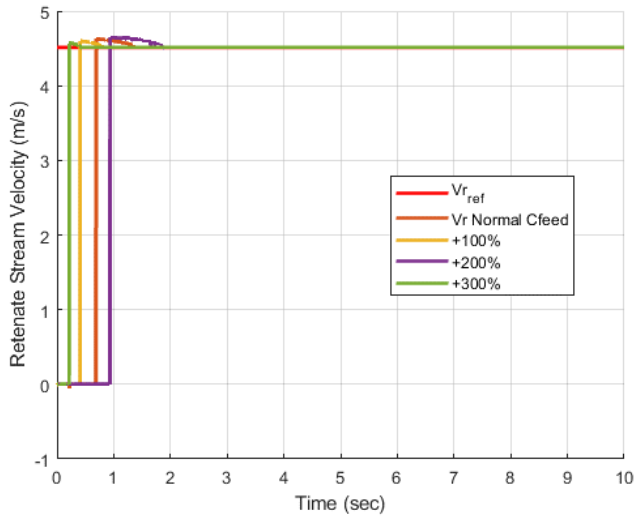
در این مقاله سیستم آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس به همراه سیستم خورشیدی فتوولتائیک به‌عنوان تأمین‌کننده انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. برای کنترل ردیابی بیشینه توان از کنترل‌کننده فازی بهینه شده با

حالت پایدار صفر در طول تغییر غلظت نمک تغذیه همگرا می‌شوند. به‌وضوح می‌توان متوجه شد که کنترل‌کننده مود لغزشی فرایچشی می‌تواند به‌طور مؤثر با تغییرات پارامتر با عملکرد عالی مقابله کند.

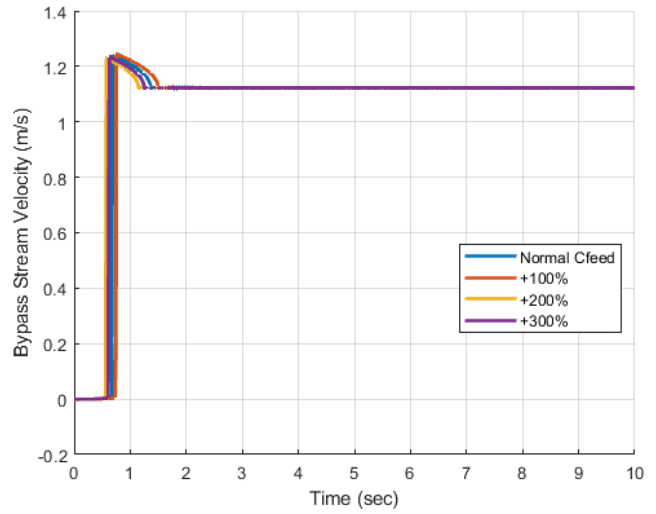
همان‌طور که در شکل ۱۱-ج مشاهده می‌شود، سرعت جریان آب کم‌نمک هنگامی کاهش می‌یابد که غلظت آب تغذیه افزایش می‌یابد، و این نتیجه انتظار می‌رود که به علت افزایش غلظت آب تغذیه، توأم با افزایش فشار اسمزی است که به افزایش جریان مقاومت از میان غشاء منجر می‌شود. افزایش فشار اسمزی سبب می‌شود فشار سیستم به‌منظور حفظ نرخ آب تغذیه ثابت افزایش یابد. بنابراین، کنترل درایو فرکانس متغیرها باید نرخ جریان تغذیه را پایین بیاورد تا فشار سیستم در نقطه تنظیم شده $457/51 \text{ psi}$ باقی بماند (شکل ۱۱-د).

مجموعه سیستم شیرین‌سازی خورشیدی اسمز معکوس با نواقص مختلفی مواجه است که می‌تواند در هر بخش از آن رخ دهد. به همین دلیل، یک آزمون کنترل تحمل خطا^۲ به‌منظور بررسی توانایی کنترل‌کننده برای مقابله با شرایط خطا انجام می‌شود. تغییر مقاومت روتور در این مجموعه از

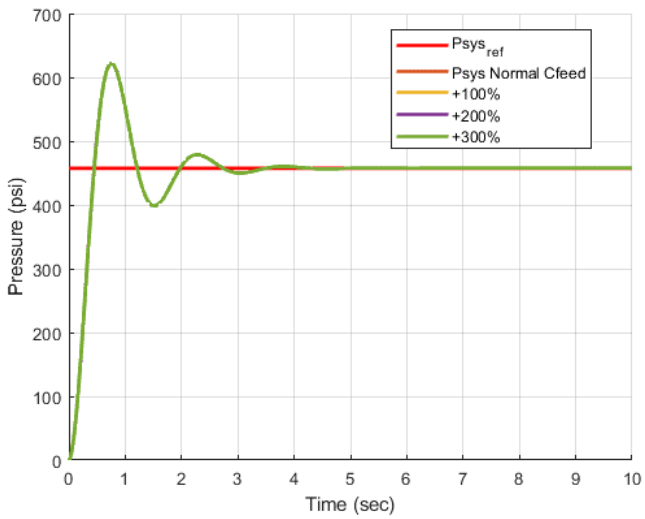
- 1 Variable Frequency Drive (VFD)
- 2 Fault Tolerant Control (FTC)



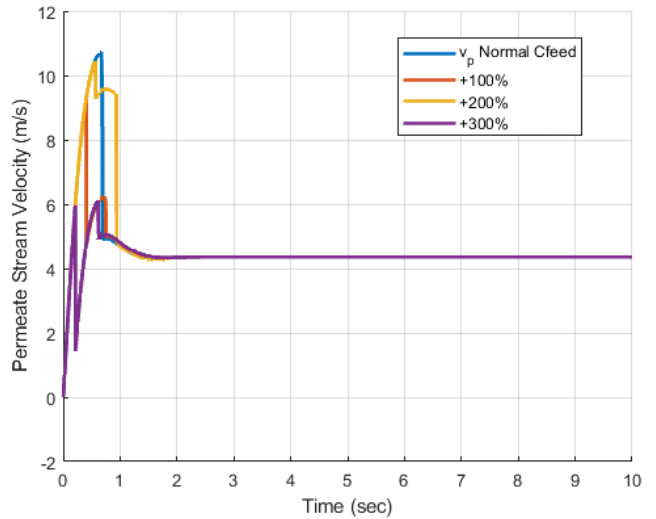
(ب)



(الف)



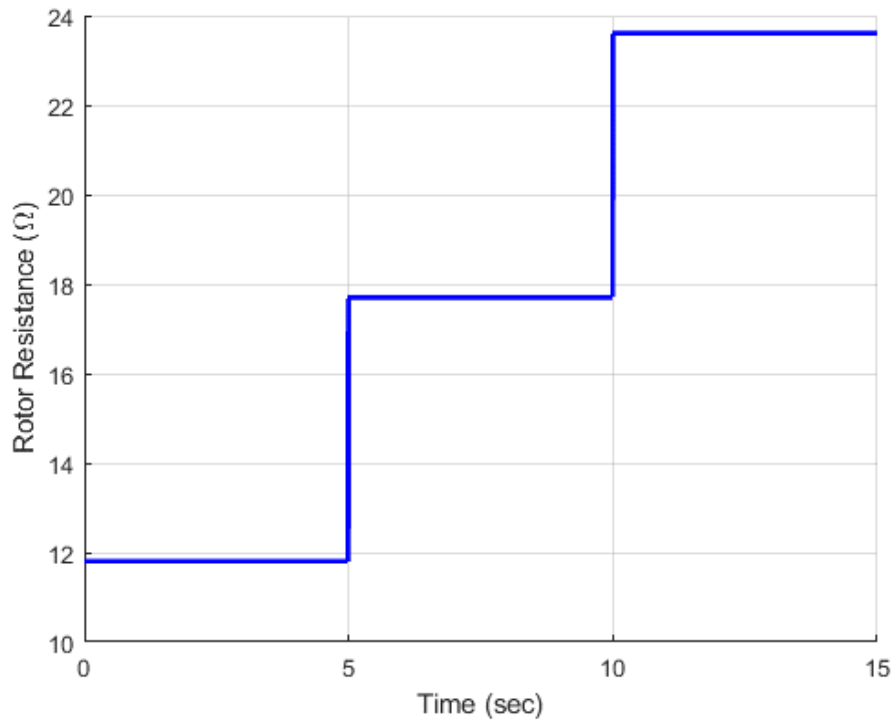
(د)



(ج)

شکل ۱۱. عملکرد سیستم در غلظت‌های متفاوت آب ورودی. (الف) سرعت جریان بای‌پس؛ (ب) سرعت جریان آب شور؛ (ج) سرعت جریان آب کم‌نمک (د) فشار سیستم

Fig. 11. Response results of RO system under feed salt concentration variation, (a) Bypass stream velocity, (b) Retentate stream velocity, (c) Permeate stream velocity, (d) System pressure.



شکل ۱۲. تغییرات مقاومت روتور جهت بررسی عملکرد کنترل کننده

Fig. 12. The variation of rotor resistance to evaluate the controller performance

فازی در انتخاب ضرایب آن، عملکرد مناسب‌تری در برابر اثرات غیرخطی زیر سیستم موتوریمپ دارد. برای بررسی این موضوع، مقاومت روتور تا ۱۰۰ درصد افزایش یافت، و عملکرد کنترلر ارزیابی گردید.

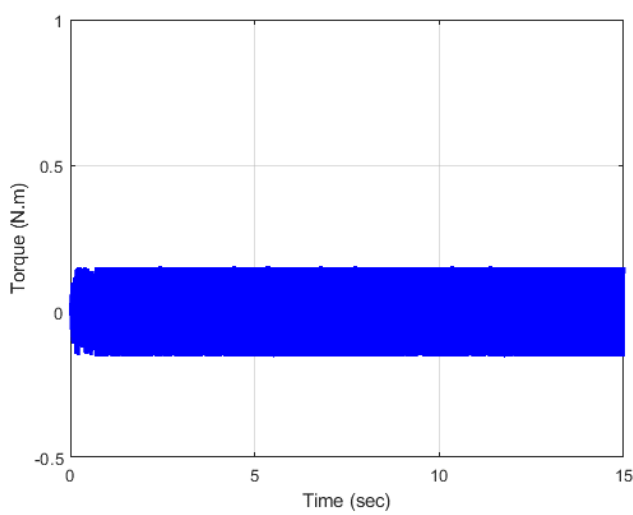
- کنترلر مود لغزشی فرایچشی پیاده‌سازی شده به‌خوبی توانسته است اغتشاشات ناشی از تغییر درجه دما و تغییر شوری آب را حذف نماید. برای این منظور عملکرد کنترل کننده در شوری‌های با افزایش ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت.

در مجموع، نتیجه شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده‌های ارائه شده نه‌تنها عملکرد مناسبی دارند بلکه در برابر تغییر شرایط مانند غلظت آب ورودی نیز مقاوم هستند. بنابراین از کنترل کننده‌های طراحی شده می‌توان برای ساخت یک سیستم اسمز معکوس با عملکرد پایدار و پایا بهره جست.

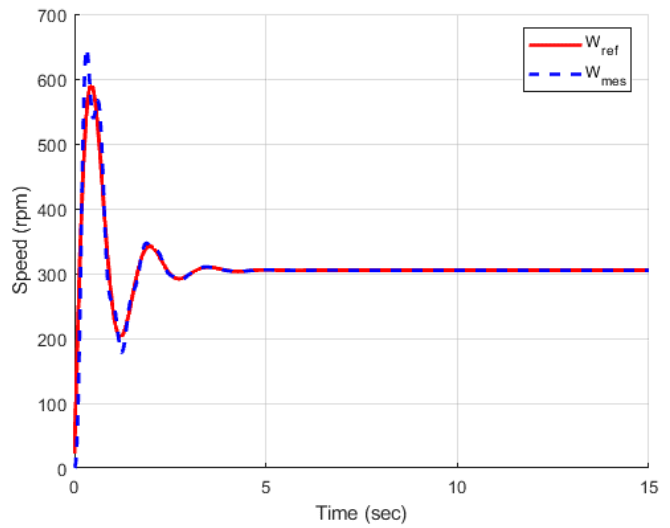
الگوریتم علف‌های مهاجم استفاده شده است. برای کنترل دور موتور و همچنین فشار پشت غشاء از کنترل کننده فازی پی‌آی‌دی استفاده شده است؛ و برای کنترل دبی‌های در سیستم اسمز معکوس از روش کنترل مود لغزشی فرایچشی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که:

- کنترل کننده فازی بهینه‌شده با الگوریتم علف‌های مهاجم عملکرد بسیار بهتر و مقاوم‌تری در مقایسه با روش تپه نوردی دارد. سیستم ردیاب بیشینه توان طراحی شده نه‌تنها به توان بیشتری دست‌یافته است، بلکه نوسانات حول توان بیشینه نیز کمتر است. همچنین این الگوریتم به‌خوبی توانسته است در تابش‌های مختلف ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، توان بیشینه را ردیابی کند.

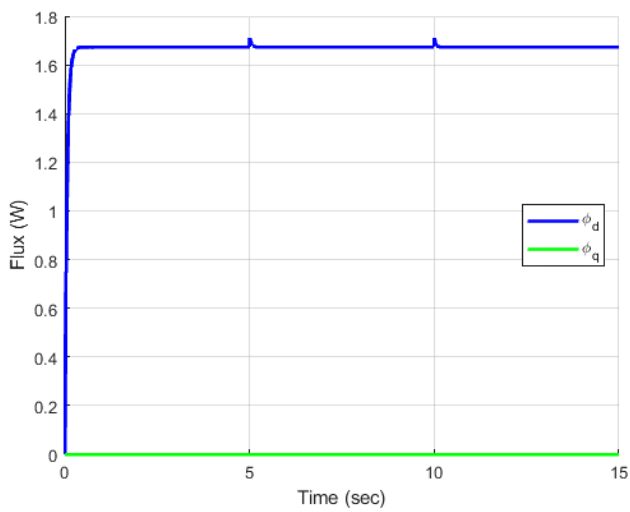
- کنترل کننده فازی پی‌آی‌دی طراحی شده به دلیل استفاده از منطق



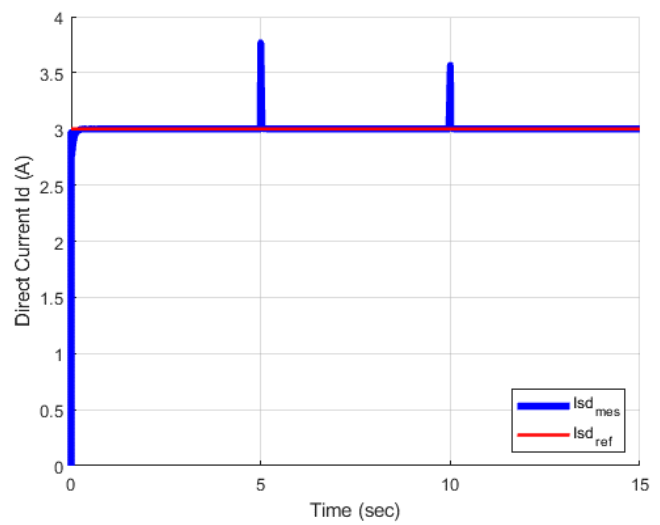
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۳. رفتار موتور در اثر تغییر در مقاومت روتور. الف) سرعت درایو فرکانس؛ ب) گشتاور الکترومغناطیسی؛ ج) جریان مستقیم؛ د) شارهای روتور

Fig. 13. Motor response in dealing with rotor resistance, (a) Frequency drive speed, (b) Electromagnetic torque, (c) Direct current, (d) Rotor fluxes

۶- فهرست علائم

منابع

- [1] S. Sobana, R.C. Panda, Modeling and control of reverse osmosis desalination process using centralized and decentralized techniques, *Desalination*, 344 (2014) 243-251.
- [2] L.F. Greenlee, D.F. Lawler, B.D. Freeman, B. Marrot, P. Moulin, Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges, *Water research*, 43(9) (2009) 2317-2348.
- [3] M.A. Eltawil, Z. Zhengming, L. Yuan, A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems, *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9) (2009) 2245-2262.
- [4] M. Alghoul, P. Poovanaesvaran, M. Mohammed, A. Fadhil, A. Muftah, M. Alkilani, K. Sopian, Design and experimental performance of brackish water reverse osmosis desalination unit powered by 2 kW photovoltaic system, *Renewable Energy*, 93 (2016) 101-114.
- [5] T. Zhao, R. Niu, M. Su, T. Anderson, Steady state and dynamic modeling of RO desalination modules and system using EES, in: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2011, pp. 1-4.
- [6] Y.-Y. Lu, Y.-D. Hu, X.-L. Zhang, L.-Y. Wu, Q.-Z. Liu, Optimum design of reverse osmosis system under different feed concentration and product specification, *Journal of membrane science*, 287(2) (2007) 219-229.
- [7] H. Sharon, K. Reddy, A review of solar energy driven desalination technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41 (2015) 1080-1118.
- [8] A.M. Bilton, L.C. Kelley, S. Dubowsky, Photovoltaic reverse osmosis—Feasibility and a pathway to develop technology, *Desalination and Water Treatment*, 31(1-3) (2011) 24-34.
- [9] I. Alatiqi, H. Ettouney, H. El-Dessouky, Process control in water desalination industry: an overview, *Desalination*, 126(1-3) (1999) 15-32.
- [10] I. Alatiqi, A. Ghabris, S. Ebrahim, System identification and control of reverse osmosis desalination, *Desalination*,
- I_{PV} جریان نهایی تولیدشده در خروجی ($I_S =$) برحسب آمپر
- I_{Ph} جریان حاصل از تابش نور برحسب آمپر
- I_{phref} جریان نامی حاصل از تابش نور در وضعیت نرمال برحسب آمپر
- I_O جریان عبوری از دیود برحسب آمپر
- I_{Oref} جریان نامی اشباع دیود برحسب آمپر
- I_{scref} جریان اتصال کوتاه در وضعیت نرمال برحسب آمپر
- T دمای سلول برحسب کلوین
- T_{ref} دمای نامی سلول برحسب کلوین
- G مقدار تابش برحسب وات بر متر مربع
- G_{ref} مقدار نامی تابش برحسب وات بر متر مربع
- q بار الکتریکی الکترون برحسب کولن
(1.6×10^{-19})
- E_g انرژی باند گپ
- k ثابت بولتزمن برحسب ژول بر کلوین
(1.38×10^{-23})
- K_{ISC} نسبت جریان اتصال کوتاه به ضریب حرارتی
- α ضریب ایده آلی دیود
- V_t ولتاژ حرارتی ($\frac{nKT}{q} =$)
- V_{PV} ولتاژ نهایی تولیدشده برحسب ولت
- V_{ocref} ولتاژ مدار باز نامی برحسب ولت
- R_s مقاومت معادل سری برحسب اهم
- R_{sh} مقاومت معادل موازی برحسب اهم

- 2009 Brazilian Power Electronics Conference, IEEE, 2009, pp. 1244-1254.
- [21] A. Pandey, N. Dasgupta, A.K. Mukerjee, High-performance algorithms for drift avoidance and fast tracking in solar MPPT system, *IEEE Transactions on Energy conversion*, 23(2) (2008) 681-689.
- [22] R. John, S.S. Mohammed, R. Zachariah, Variable step size Perturb and observe MPPT algorithm for standalone solar photovoltaic system, in: 2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), IEEE, 2017, pp. 1-6.
- [23] J.P. Ram, T.S. Babu, N. Rajasekar, A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67 (2017) 826-847.
- [24] C. Serir, D. Rekioua, N. Mezzai, S. Bacha, Supervisor control and optimization of multi-sources pumping system with battery storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45) (2016) 20974-20986.
- [25] M. Ouada, M.S. Meridjet, M.S. Saoud, N. Derradji, Study of new configuration photovoltaic pumping system, in: 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), IEEE, 2014, pp. 1-5.
- [26] M.A. Abdullah, A.H.M. Yatim, C.W. Tan, R. Saidur, A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5) (2012) 3220-3227.
- [27] P. Vas, Sensorless vector and direct torque control, (1998).
- [28] S.G. Malla, C. Bhende, S. Mishra, Photovoltaic based water pumping system, in: 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal, IEEE, 2011, pp. 1-4.
- [29] M.A. Vitorino, M.B. de Rossiter Corrêa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima, An effective induction motor control for photovoltaic pumping, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4) (2010) 1162-1170.
- [30] G. Abdelmajid, B.S. Mohamed, T. Mohamed, S. 75 (1989) 119-140.
- [11] B.D.H. Phuc, S.-S. You, T.-W. Lim, H.-S. Kim, Dynamical analysis and control synthesis of RO desalination process against water hammering, *Desalination*, 402 (2017) 133-142.
- [12] C.W. McFall, A. Bartman, P.D. Christofides, Y. Cohen, Control and monitoring of a high recovery reverse osmosis desalination process, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(17) (2008) 6698-6710.
- [13] A.R. Bartman, P.D. Christofides, Y. Cohen, Nonlinear model-based control of an experimental reverse-osmosis water desalination system, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(13) (2009) 6126-6136.
- [14] M. Zebbar, Y. Messlem, A. Gouichiche, M. Tadjine, Super-twisting sliding mode control and robust loop shaping design of RO desalination process powered by PV generator, *Desalination*, 458 (2019) 122-135.
- [15] Z.-Y. Zhao, M. Tomizuka, S. Isaka, Fuzzy gain scheduling of PID controllers, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(5) (1993) 1392-1398.
- [16] M. Arrouf, S. Ghabrou, Modelling and simulation of a pumping system fed by photovoltaic generator within the Matlab/Simulink programming environment, *Desalination*, 209(1-3) (2007) 23-30.
- [17] C.-E. Feraga, A. Bouldjedri, Performanse fotonaponskog sustava pumpanja pogonjenog jednofaznim indukcijskim motorom spojenim na fotonaponski generator, *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, 57(1) (2016) 163-172.
- [18] D. Chan, J. Phillips, J. Phang, A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters, *Solid-State Electronics*, 29(3) (1986) 329-337.
- [19] K. Rahrah, D. Rekioua, T. Rekioua, S. Bacha, Photovoltaic pumping system in Bejaia climate with battery storage, *International journal of hydrogen energy*, 40(39) (2015) 13665-13675.
- [20] M.G. Villalva, J.R. Gazoli, E. Ruppert Filho, Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays, in:

- [35] M. Benbouzid, High-order sliding mode control of DFIG-based wind turbines, in: Wind turbine control and monitoring, Springer, 2014, pp. 23-48.
- [36] A.K. Pati, N. Sahoo, Adaptive super-twisting sliding mode control for a three-phase single-stage grid-connected differential boost inverter based photovoltaic system, ISA transactions, 69 (2017) 296-306.
- [37] S. Shahrokhian, R. Mohammadi, E. Asadian, One-step fabrication of electrochemically reduced graphene oxide/nickel oxide composite for binder-free supercapacitors, International Journal of Hydrogen Energy, 41(39) (2016) 17496-17505.
- [38] C. Lascu, F. Blaabjerg, Super-twisting sliding mode direct torque control of induction machine drives, in: 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE, 2014, pp. 5116-5122.
- Ahmed, M. Youcef, An improved stator winding fault tolerance architecture for vector control of induction motor: Theory and experiment, Electric power systems research, 104 (2013) 129-137.
- [31] A.R. Bartman, C.W. McFall, P.D. Christofides, Y. Cohen, Model-predictive control of feed flow reversal in a reverse osmosis desalination process, Journal of Process Control, 19(3) (2009) 433-442.
- [32] A.R. Bartman, A. Zhu, P.D. Christofides, Y. Cohen, Minimizing energy consumption in reverse osmosis membrane desalination using optimization-based control, Journal of Process Control, 20(10) (2010) 1261-1269.
- [33] W. Perruquetti, J.-P. Barbot, Sliding mode control in engineering, CRC press, 2002.
- [34] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, A. Levant, Sliding mode control and observation, Springer, 2014.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Darvishnezhad, M. Nazari, M. Nazari, M. M. Shah Mardan, Robust Control of Integrated Reverse Osmosis Desalination System with Photovoltaic Power Supply, Amirkabir J. Mech Eng., 54(3) (2022) 567-588.

DOI: 10.22060/mej.2022.20100.7168



