

Online Control of the Solar Tracker System Using the Controller Adaptive PID on Kalman Filter

Moazameh Sadeghi¹, Ramazan Havangi²

¹ Ph.D Student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

moazameh-sadeghi@birjand.ac.ir

² Associate Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

havangi@birjand.ac.ir

Abstract:

In this paper, a robust two-axis rotary-linear solar tracking system is designed and built. Adaptive PID controller is used to determine the optimal performance of the system, determine the controller input, adjust the controller parameters and the stability of the whole system, and the adaptive PID controller parameters are designed and adjusted using the reference model by Kalman filter. By adjusting the parameters of the adaptive PID controller based on the Kalman filter, the disturbances and uncertainty entered into the system during tracking in a short time have been well suppressed and the system has been stabilized online. Adaptive PID controller based on Kalman filter, has increased the efficiency of production power in steady-state, single-axis and two-axis, and also reduced the energy consumption of motors. In order to evaluate the control of the solar tracking system in eliminating natural disturbances, accurate tracking and receiving maximum power from the environment, a comparison was made between the performance of adaptive PID controller based on Kalman filter and PID controller based on offline and online optimization algorithms.

Keywords: Photovoltaic system, Solar Tracker, Uncertainty, Disturbances, Adaptive PID controller, Reference model, Kalman filter

Article Type: Research

Received: 2022. 11. 15

Revised: 2023. 25. 06

Accepted: 2023. 08. 26

Corresponding author: R.Havangi

Corresponding author's address: Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran



1. Motivation of the work

In general, all online systems have noise and disturbance, and sometimes they suffer from uncertainty. Solar trackers are not exempt from this rule, these systems are subject to uncertainty, natural disturbances, measurement error of sensors and other disturbances. These disturbances affect the performance of the system and sometimes even lead to system instability. Reducing and eliminating these disturbances is a very important issue in receiving maximum power from the sun. So far, different methods have been used to control photovoltaic systems in order to solve these disturbances. In some researches, they have tried to reduce these disturbances by changing the system structure, which is very costly. It is very important to be economically viable and at the same time to be accurate in tracking. The meaning of accurate tracking is that the system tracks the sun with high accuracy and speed without being affected by uncertainty and external disturbances, and the maximum power is obtained. One of the methods that are resistant to uncertainty and disturbance and can be used online is the Kalman filter. The Kalman filter identifies the system and accurately designs and adjusts the PID parameters based on the system in each period. By adjusting control parameters using the Kalman filter, the speed and accuracy of tracking a two-axis rotating-linear system can be improved while reducing overshoot and settling time.

2. Contributions

In this research, the adaptive PID controller based on the Kalman filter has been applied to the two-axis solar tracking system using the reference model, and its performance has been checked in offline and online mode. In order to accurately control the two-axis solar tracking system against environmental effects, remove uncertainty and natural disturbances, and accurately track, a comparison has been made between the performance of the adaptive PID controller based on the Kalman filter and the PID controller based on optimization algorithms in offline. in online mode. the optimization algorithms of firefly, cuckoo, particle swarm-genetic optimization algorithm, Imperialist Competitive algorithm and Kalman filter have been used to optimize the PID controller parameters. The simulation show that Kalman filter system performed better than other optimization algorithms in offline mode. According to the results obtained in the online mode and applying disturbances to the optimal PID controller system based on optimization algorithms did not perform well and caused system instability. The disturbance is applied to the output of the system as a Gaussian noise with mean 0 and variance 1 at the moment $350 < T < 360$ for 10 seconds. According to the obtained results, the effect of uncertainty and disturbance on the output of the system has been removed by the PID controller based on Kalman filter and the tracking has continued in a stable manner.

3. Procedures

In order to maintain the stability of the system in removing uncertainty and removing natural disturbances while increasing the tracking speed, the adaptive design of the PID controller based on the Kalman filter using the reference model is given. An uncertainty of 200 seconds is applied to the system for 50 seconds. This uncertainty can be caused by the discrepancy between the model and the reality of the system. Also, the disturbance is applied to the output of the system as a Gaussian noise with a mean of 0 and a variance of 1 at the moment $350 < T < 360$ for 10 seconds. According to the obtained results, the effect of uncertainty and disturbance on the output of the system has been removed by the PID controller based on Kalman filter and the tracking has continued in a stable manner. Experiments have been carried out during several stages in consecutive days, for partly cloudy and sunny days. It shows the power received from the system on a partially cloudy day. According to the results, the system has received the maximum power from the environment by removing the disturbance caused by the cloud. During 14 hours of tracking, the energy consumption of the motors is equal to 3.25 watts per hour. According to 7 hours of sunlight, the energy consumption of motors in two axis mode is 1.12(wh), which is very insignificant and negligible compared to the received power in two axis mode, which is 226(wh).

4. Findings

Solar tracking systems are exposed to natural disturbances such as clouds, wind, measurement error and other environmental factors. These disturbances during tracking sometimes lead to instability of solar tracking systems. So far, different methods have been used to control photovoltaic systems in order to solve these disturbances. In some researches, they have tried to reduce these disturbances by changing the system structure, which is very costly [10]. According to the obtained results, optimization algorithms and many methods have been used to estimate photovoltaic parameters and adjust PID controller parameters in offline mode, which have performed well, but these algorithms become unstable when disturbances enter the system and cause damage to the system. The adaptive PID controller based on the Kalman filter can simultaneously solve the uncertainty (which can be caused by the modeling error) in a very short period of time, as well as quickly solve the system disturbance and make the system stable. Continue with appropriate speed and accuracy. The removal of disturbances by the adaptive PID controller based on the Kalman filter increases the production power in partly cloudy and sunny weather and reduces the energy consumption of the engines.

5. Conclusion

The adaptive PID controller based on the Kalman filter is applied to the system using the reference model. The adaptive PID controller of the system has been investigated in both offline and online modes. In offline mode, Kalman filter and four algorithms of firefly, cuckoo, genetic-particle swarm and Imperialist Competitive have been used. According to the obtained results, Kalman has performed better than other algorithms in offline mode. In online mode and applying uncertainty and disturbance to the optimized controller system based on optimization algorithms, it did not perform well and caused system instability.

In the online mode, by applying uncertainty and disturbance to the system, the adaptive controller based on the Kalman filter has been able to remove the uncertainty and disturbance and bring the system to stability in a very short period of time. The results of practical tests, tracking speed of the system, the power produced by the system and the energy consumed by the motors using the adaptive PID controller by the Kalman filter during the tests on partly cloudy and sunny weather days are given. The adaptive PID controller based on the Kalman filter has increased the power reception by 37.3% compared to the stationary state with one moving axis and 49.7% increase in the energy reception compared to the stationary state with two moving axes.

کنترل آنلاین سیستم ردياب خورشیدی با استفاده از کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن

معظمه صادقی^۱، رمضان هاوَنگی^۲

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

moazameh-sadeghi@birjand.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

havangi@birjand.ac.ir

چکیده: سیستم‌های فتوولتائیک یکی از سامانه‌های تولید برق از خورشید می‌باشند. برای دریافت حداکثر توان و افزایش کارایی سلول‌های فتوولتائیک، ردیابی موقعیت خورشید با دقت بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سیستم‌های ردیاب خورشیدی در معرض اغتشاشات طبیعی از جمله ابر، باد، خطای اندازه‌گیری و دیگر عوامل محیطی می‌باشند. این اغتشاشات در حین ردیابی گاهی منجر به ناپایداری سیستم‌های ردیاب خورشیدی می‌شوند. در این مقاله، سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره چرخان- خطی مقاوم، طراحی و ساخته شده است. به منظور کنترل و ردیابی دقیق سیستم، کنترل‌کننده PID تطبیقی برای تعیین عملکرد مطلوب سیستم، تعیین ورودی کنترل‌کننده، تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده و پایداری کل سیستم اعمال گردیده و پارامترهای کنترل‌کننده PID تطبیقی با استفاده از مدل مرجع و توسط فیلتر کالمن طراحی و تنظیم گردیده است. با تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن، عدم قطعیت و اغتشاشات وارد شده به سیستم در حین ردیابی در مدت زمان کوتاه به خوبی رفع گردیده و موجب پایداری سیستم در حالت آنلاین شده است. کنترل‌کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن، موجب بهره‌وری بیشتر توان تولیدی در حالت ثابت، یک محوره و دو محوره و همچنین موجب کاهش انرژی مصرفی موتورها شده است. به‌منظور ارزیابی کنترل سیستم ردیاب خورشیدی در رفع اغتشاشات طبیعی، ردیابی دقیق و دریافت حداکثر توان از محیط، مقایسه‌ای بین عملکرد کنترل‌کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن و کنترل‌کننده PID مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حالت آفلاین و آنلاین، صورت گرفته است.

کلمات کلیدی: سیستم فتوولتائیک، ردیاب خورشیدی، عدم قطعیت، اغتشاشات، کنترل‌کننده PID تطبیقی، مدل مرجع، فیلتر کالمن

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴

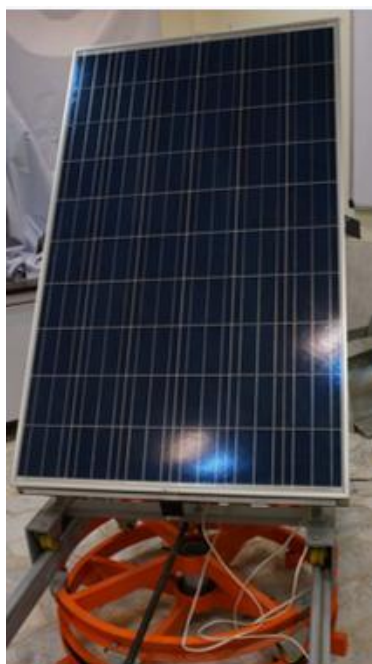
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر رمضان هاوَنگی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - بیرجند - انتهای بلوار دانشگاه - پردیس شوکت آباد - دانشگاه بیرجند - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

با توجه به پایان پذیری انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی بشر باید جایگزین مناسبی برای این سوخت‌ها در نظر بگیرد. از آنجا که سوخت‌های اتمی هزینه‌های سنگین و تعشعات خطرناک نیروگاهی دارند، جانشین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی نیستند. به همین جهت تحقیقات بشر به سمت انرژی تجدیدپذیر سوق یافته است [۱-۳]. در بین انرژی‌های تجدیدپذیر سیستم‌های فتوولتائیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۴]. استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک جهت تولید انرژی الکتریکی در کشور ما رو به افزایش است [۵]. توجه به آمارها افزایش ظرفیت تولید برق نیروگاه‌های فتوولتائیک در جهان در سال ۲۰۲۰ به ۱۲۷ گیگا بایت رسیده است [۶]. پیشرفت‌های تکنولوژی اخیر سبب تولید برق مدام و ارزان از منابع انرژی تجدیدپذیر شده است [۷]. تغییرات حرکتی خورشید یکی از مشکلاتی است که دریافت انرژی خورشید را محدود می‌نماید. بیشتر پنل‌های خورشیدی به صورت ثابت نصب می‌شوند، به تغییرات حرکتی خورشید حساس نیستند [۸]. با توجه به متغیر بودن موقعیت خورشید در طول روز، سیستم‌های ردیابی در افزایش توان دریافتی از خورشید بسیار موثر می‌باشند [۹]. استفاده از یک متمرکزکننده خورشید در ترکیب با یک ردیاب خورشیدی می‌تواند برای تغییرات حرکتی خورشید مناسب باشد [۱۰]. توان تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی محدود است و بازدهی آن‌ها با توجه به نیازهای جامعه امروز کند است، افزایش حتی چند درصد دریافت توان بدون تغییر در ساختار پنل‌ها می‌تواند بسیار موثر باشد. بیشترین انرژی از نور خورشید در زاویه مستقیم نسبت به سیستم ردیابی دریافت می‌شود [۱۱]. در [۱۲] مقایسه‌ای بین ردیاب یک محوره و حالت ثابت انجام شد، نتایج این مقاله نشان می‌دهد که ردیاب خورشیدی نسبت به حالت ثابت ۲۰ درصد توان بیشتری تولید می‌نماید. همچنین، ردیاب دو محوره طراحی شده در [۱۳] افزایش ۳۳ درصدی نسبت به حالت ثابت را نشان می‌دهد. در [۱۴] انواع ردیاب‌ها مورد بررسی قرار گرفته است، ردیاب‌هایی با سنسور خورشیدی، ردیاب‌هایی نجومی و ردیاب‌هایی که براساس تاریخ و زمان تنظیم می‌شوند. اولین سیستم ردیابی، با استفاده از اختلاف شدت نور در سنسورهای موقعیت جهت خورشید را تشخیص می‌دهد و جهت پنل را با استفاده از حرکت موتورها و کنترل آن از طریق ریز پردازنده تنظیم می‌نماید. در دومین سیستم ردیابی، سیستم کنترلی، موقعیت خورشید را بر اساس تاریخ و زمان محاسبه می‌نماید و موتورها برای دستیابی به موقعیت مطلوب کنترل می‌شوند. در [۱۵] سیستم ردیاب خورشیدی ثابت در وضعیت با سنسور و بدون سنسور بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در وضعیت ردیابی بدون سنسور، سالیانه ۲۴/۵۹ درصد توان بیشتری دریافت شده است. در صورتی که در وضعیت ردیابی با سنسور سالیانه ۳۵/۲۲ درصد افزایش توان حاصل شده است. در [۱۶] سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره با سنسور LDR آورده شده است. یک ردیاب دو محوره در [۱۷] براساس

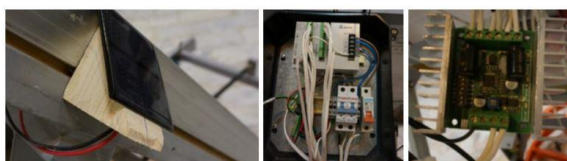
پردازش تصاویر سایه میله‌ای طراحی گردیده، اجزای این سیستم شامل یک جسم، دوربین، مدار الکترونیکی، کنترل‌کننده کامپیوتری و موتورهای پله‌ای می‌باشد مطابق، نتایج حاصل شده دقت ردیابی را نزدیک $\pm 2^\circ$ است. در هر منطقه جغرافیایی استفاده می‌شود. کنترل سیستم ردیاب دو محوره در [۱۸] توسط یک دستگاه الکترونیکی انجام می‌شود این دستگاه وظیفه کنترل موتورها، ذخیره سازی نورانی و اندازه‌گیری اطلاعات تابشی از پنل را بر عهده دارد. در [۱۹] پارامترهای کنترل‌کننده PID سیستم ردیاب خورشیدی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات^۱ که بر اساس روش تاگوچی^۲ و نقشه لجستیک بهبودیافته، طراحی و تنظیم می‌گردد. پارامترهای کنترل‌کننده PID موتور DC در [۲۰] با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات طراحی و تنظیم شد، مطابق نتایج با تنظیم ضرایب کنترل‌کننده توسط الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات دقت سیستم در ردیابی افزایش یافته است. در [۲۱] پارامترهای کنترل‌کننده PID سیستم ردیاب خورشیدی را با سه الگوریتم کرم شب‌تاب^۳ (FFA)، الگوریتم فاخته (CSA)^۴، و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهینه مورد بررسی قرار گرفت نتایج حاکی از آن است که الگوریتم فاخته سرعت همگرایی بهتری دارد. کنترل‌کننده PID-PSO برای دستیابی به حداکثر توان دریافتی از خورشید با روش مشاهده و خطا (P&O)^۵ مقایسه شد مطابق نتایج بدست آمده کنترل‌کننده PID-PSO عملکرد بهتری دارد [۲۲]. کنترل‌کننده PID استفاده شده در [۲۳] توسط قوانین فازی کنترل می‌شود. الگوریتم رقابت استعماری^۶ (ICA) برای تخمین پارامترهای مدل PV نسبت به الگوریتم تفاضلی و زنبور عسل عملکرد بهتری دارد [۲۴]. کنترل سیستم ترکیبی بادی و فتوولتائیک که شامل منابع انرژی باتری و ژنراتور دیزل می‌باشند، با تابع هدف انرژی و قیمت برق در [۲۵] مورد بحث قرار گرفت، تابع هزینه انرژی (COE) با استفاده از الگوریتم^۸ GA-PSO و MOPSO^۹ حداقل شد. فیلتر کالمن در بسیاری از صنایع مانند هوافضا، وسایل نقلیه، ربات‌ها و پیش بینی آب و هوا مورد استفاده واقع شده است [۲۶]. در [۲۷] از فیلتر کالمن توسعه یافته و سیستم‌های فتوولتائیک برای تخمین حالت‌های سیستم توزیع استفاده شده است. الگوریتم فیلتر کالمن در مقایسه با الگوریتم هدایتی افزایشی برای بهینه‌سازی انرژی سیستم‌های فتوولتائیک در [۲۸] عملکرد بهتری از نظر زمان پاسخ، کارایی و پایداری دارد. از فیلتر کالمن و شبکه عصبی برای تخمین پارامترهای سیستم فتوولتائیک جدید استفاده شده است [۲۹]. به طور کلی تمامی سیستم‌ها در حالت آنالین دارای نویز و اغتشاش هستند، و گاهی نیز دچار عدم قطعیت می‌شوند. ردیاب‌های خورشیدی نیز از این قاعده مستثنی نیستند، این سیستم‌ها در معرض عدم قطعیت، اغتشاشات طبیعی، خطای اندازه‌گیری سنسورها و دیگر اغتشاشات نیز می‌باشند. این اغتشاشات بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد و گاهی حتی منجر به ناپایداری سیستم می‌گردد. کاهش و رفع این اغتشاشات موضوع بسیار حائز اهمیتی در دریافت حداکثر توان از خورشید



شکل (۱): سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره چرخان-خطی

۲- مدل سازی سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره چرخان-خطی

برای دریافت حداکثر توان از محیط باید سیستمی طراحی گردد که توانایی چرخش حول دو محور عمودی و افقی را دارا باشد. ساختار سیستم ردیاب خورشیدی در شکل ۱، آورده شده است. پنل استفاده شده در این سیستم ۲۴۰ وات بر ساعت تولید توان دارد. از موتورهای کم مصرف برای حرکت دورانی ۳۶۰ درجه و حرکت خطی ۱۸۰ درجه تشکیل شده است. سیستم ردیاب خورشیدی چرخان-خطی در شرایط آب و هوایی مختلف، از طلوع تا غروب خورشید ردیابی را با حداکثر دریافت توان انجام می دهد. پارامترهای کنترل کننده PID تطبیقی براساس فیلتر کالمن به گونه ای تنظیم شده اند که می توانند با وجود اغتشاش و عدم قطعیت در هوای نیمه ابری حداکثر توان را از خورشید دریافت نمایند شکل (۲) قسمت (الف) درایور، قسمت (ب) PLC و قسمت (ج) سنسورهای به کار برده شده در سیستم را نشان می دهد.



(الف) (ب) (ج)

شکل (۲): (الف) درایور، (ب) PLC، (ج) سنسور فتوولتائیک

سنسورهای فتوولتائیک در چهار طرف سیستم با زاویه ۴۵ درجه مطابق شکل (۲) قرار گرفته اند. انحراف از زاویه خورشید با استفاده از این چهار سنسور محاسبه می شود. ولتاژدریافتی توسط این سنسورها از

می باشد، تاکنون از روش های مختلف برای کنترل سیستم های فتوولتائیک به منظور رفع این اغتشاشات استفاده گردیده است. در بعضی تحقیقات با تغییر ساختار سیستم سعی در کاهش این اغتشاشات نموده اند که بسیار پرهزینه می باشد [۱۰]. از الگوریتم های بهینه سازی و بسیاری از روش ها به منظور تخمین پارامترهای فتوولتائیک و تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID در حالت آفلاین استفاده شده است که عملکرد خوبی هم داشته اند [۲۰-۲۶]. به صرفه بودن از لحاظ اقتصادی و در عین حال دقیق بودن ردیابی، موضوع بسیار حائز اهمیتی است. منظور از ردیابی دقیق، ردیابی است که سیستم بدون تاثیر از عدم قطعیت و اغتشاشات بیرونی با دقت و سرعت زیاد و به صورت پایدار خورشید را ردیابی نماید و بیشترین توان حاصل گردد. یکی از روش هایی که در مقابل عدم قطعیت و اغتشاشات مقاوم اند و در حالت آنلاین می توان از آنها استفاده نمود فیلتر کالمن است. در این تحقیق پارامترهای کنترل کننده PID تطبیقی با استفاده از مدل مرجع سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره و بر اساس فیلتر کالمن در حالت آفلاین و آنلاین طراحی و تنظیم گردیده است. به منظور کنترل دقیق سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره در مقابل اثرات محیطی، رفع عدم قطعیت و اغتشاشات طبیعی و ردیابی دقیق مقایسه ای بین عملکرد کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن و کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم های بهینه سازی در حالت آفلاین و آنلاین، صورت گرفته است. فیلتر کالمن سیستم را شناسایی می نماید و بر اساس سیستم در هر دوره پارامترهای PID را به صورت دقیق طراحی و تنظیم می نماید. با تنظیم پارامترهای کنترلی توسط فیلتر کالمن با کاهش فراجاهش و زمان نشست، سرعت و دقت ردیابی سیستم دو محوره چرخان-خطی افزایش می یابد.

ساختار ادامه مقاله به صورت زیر است، در بخش ۲ مدل سازی سیستم محوره چرخان-خطی آورده شده است. در بخش ۳ طراحی کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن مورد بحث قرار گرفته است. در بخش ۴ نتایج و بررسی عملکرد سیستم در حالت آفلاین و آنلاین آورده شده است. در بخش ۵ انرژی مصرفی موتورها و توان تولیدی با روش کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن آورده شده است. سرانجام، در بخش ۶ با نتیجه گیری مقاله به اتمام می رسد.

$$\begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{K_f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{app} \quad (8)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + f_d \quad (9)$$

f_d اغتشاش است که به صورت نویز گوسی با میانگین ۰ و واریانس ۱ وارد می‌شود. اغتشاش وارد شده در ادامه توسط کنترل کننده PID مبتنی بر فیلتر کالمن از بین می‌رود. تابع تبدیل موتور DC (نسبت خروجی $y(t)$ به ورودی V_{app}) به صورت است [۳۰].

$$G(s) = \frac{K_m}{LJs^2 + (RJ + LK_f)s + (RK_f + K_mK_b)} \quad (10)$$

۳- طراحی کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن

۳-۱- طراحی کنترل کننده PID تطبیقی با استفاده از مدل مرجع

کنترل کننده PID به دلیل سادگی در پیاده‌سازی سخت افزاری و سادگی در تنظیم پارامترها از جمله کنترل کننده‌های رایج در صنعت است. سیگنال کنترلی $u(k)$ ، کنترل کننده PID در حوزه زمان به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$u(k) = K_p(e(k) + 1/T_i \int e(k)dt + T_d \frac{d}{dt}e(k)) \quad (11)$$

k پارامتری برحسب زمان است. K_p ضریبی از خطای حال، T_i ضریبی از حاصل جمع خطای گذشته و T_d ضریبی از مشتق خطا می‌باشد. ساختار گسسته کنترل کننده PID سرعت به صورت زیر است.

$$\Delta u(k) = K_f(k)e(k) - K_p(k)\Delta y(k) - K_D(k)\Delta^2 y(k) \quad (12)$$

$u(k)$ و $y(k)$ به ترتیب ورودی و خروجی سیستم است.

$e(k) = r(k) - y(k)$ اختلاف بین خروجی مدل مرجع $r(k)$ و خروجی سیستم است.

$K_p(k)$ ، $K_f(k)$ و $K_D(k)$ بترتیب پارامترهای کنترل کننده PID هستند.

$\Delta = 1 - z^{-1}$ و اپراتور بازگشتی است که بدین صورت تعریف می‌گردد.

$$z^{-1}y(k) = y(k-1)$$

با جایگذاری در معادله (۱۲) داریم:

$$\Delta u(k) = K_f(k)(r(k) - y(k)) - K_p(k)(1 - z^{-1})y(k) - K_D(k)(1 - z^{-1})^2 y(k)$$

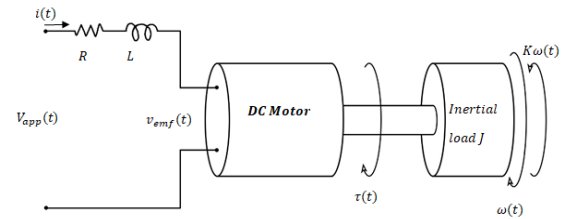
که با مرتب کردن طرف دوم معادله فوق به صورت (۱۳) خلاصه می‌شود.

$$r(k) = \phi(k) \quad (13)$$

که $\phi(k)$ به صورت (۱۴) است.

طریق PLC به کامپیوتر منتقل شده. و اختلاف ولتاژ محاسبه می‌گردد. موتورها بر اساس فرمان صادر شده از PLC پل را به صورت چرخشی یا خطی به سمت خورشید حرکت می‌دهند.

شکل ۳، مدل موتور DC به کاربرده شده در سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره چرخان- خطی را نشان می‌دهد. پارامترهای موتور DC شامل مقاومت مدار متوسط با اندیس R، اندوکتانس آرمیچر با اندیس L نشان داده شده است. روابط آورده شده در زیر شامل روابط پتانسیل الکتریکی، نیروی مکانیکی، قانون القای فارادی، و قانون آمپر است.



شکل (۳): مدل ساده موتور DC در حال چرخاندن بار اینرسی [۳۰]

گشتاور τ دیده شده در محور موتور با جریان $i(t)$ در زمان t ناشی از ولتاژ اعمال شده V_{app} است. در نتیجه:

$$\tau(t) = K_m i(t) \quad (1)$$

که در آن نیروی محرکه الکتریکی V_{emf} متناسب با سرعت زاویه‌ای ω می‌باشد. که بدین صورت بدست می‌آید K_m ثابت آرمیچر است

$$V_{emf}(t) = K_b \omega(t) \quad (2)$$

K_b ثابت نیرو محرکه الکتریکی می‌باشد. بخش مکانیکی معادلات موتور با استفاده از قانون دوم نیوتون حاصل شده است. اینرسی بار J در مشتق سرعت زاویه‌ای با مجموع با تمام گشتاورهای روی موتور برابر است.

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum \tau_i = -K_f \omega(t) + K_m i(t) \quad (3)$$

که در آن K_f یک تقریب خطی برای گشتاور اصطحاک است معادلات بخش الکتریکی بدین صورت است:

$$V_{app}(t) - V_{emf} = L \frac{di}{dt} + Ri(t) \quad (4)$$

$$V_{app}(t) = L \frac{di}{dt} + Ri(t) + K_b \omega(t) \quad (5)$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L} i(t) - \frac{K_b}{L} \omega(t) + \frac{1}{L} V_{app}(t) \quad (6)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{J} K_f \omega(t) + \frac{1}{J} K_m i(t) \quad (7)$$

معادلات فضای حالت برای موتور DC از معادله (۶) و (۷) بدست می‌آیند. جریان i و سرعت زاویه‌ای خروجی ω دو متغیر حالت می‌باشند.

فیلتر کالمن الگوریتمی است که می‌تواند میانگین مربعات خطای را به حداقل برساند.

$$\hat{x}^*(k) = \arg \min_{\hat{x}(k)} J(\hat{x}(k)) \quad (21)$$

$$J(\hat{x}(k)) = E[(x(k) - \hat{x}(k))^T (x(k) - \hat{x}(k))] \quad (22)$$

که بردارهای متغیرهای حالت واقعی را نشان می‌دهد. در الگوریتم فیلتر کالمن، میانگین و کواریانس به صورت بازگشتی توسط مرحله پیش بینی و مرحله به روز رسانی به صورت زیر بدست می‌آیند.

۱- مرحله پیش بینی

$$\hat{x}^-(k) = A(k-1)\hat{x}(k-1) + b(k-1)u(k-1) \quad (23)$$

$$P^-(k) = A(k-1)P(k-1) + A^T(k-1) + \sigma_v^2(k-1)b(k-1)b^T(k-1) \quad (24)$$

که $\hat{x}^-(k)$ و $P^-(k)$ بترتیب میانگین و کواریانس مرحله پیش بینی می‌باشند.

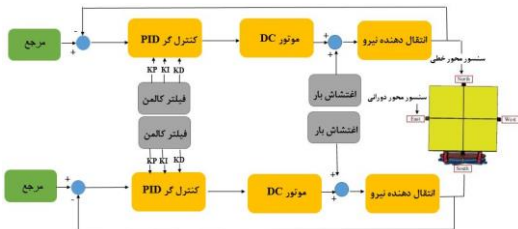
۲- مرحله به روز رسانی

$$k(k) = \frac{P^-(k)c(k)}{c^T(k)P^-(k)c(k) + \delta_w^2(k)} \quad (25)$$

$$\hat{x}(k) = \hat{x}^-(k) + k(k)(y(k) - c(k)^T \hat{x}^-(k)) \quad (26)$$

$$P(k) = (I - k(k)c^T(k))P^-(k) \quad (27)$$

که بترتیب $k(k)$ بهره کالمن، $\hat{x}(k)$ میانگین و $P(k)$ کواریانس مرحله به روزرسانی باشند. ساختار کلی الگوریتم کنترلی سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره چرخان-خطی بر اساس فیلتر کالمن در شکل (۴) نشان داده شده‌است.



شکل (۴): ساختار کلی الگوریتم کنترلی سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره چرخان-خطی بر اساس فیلتر کالمن

۳-۳- الگوریتم اعمال شده به سیستم

کنترل سیستم ردیاب خورشیدی با استفاده از کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن به صورت زیر فرمول بندی شده‌است.

$$\theta^*(k) = \arg \min_{\theta(k)} J(\theta^*(k)), \theta^*(k) \quad (28)$$

$$J(\theta^*(k)) = E[(\theta(k) - \theta^*(k))^T (\theta(k) - \theta^*(k))] \quad (29)$$

$\theta(k)$ پارامترهای کنترل کننده ایده ال را بیان می‌نماید و بدین صورت است.

$$\theta(k) = [a_1(k) \ a_2(k) \ a_3(k)]^T$$

$$\begin{aligned} \varphi(k) &= a_1(k)\Delta u(k) + a_2(k)\{y(k) - y(k-2)\} \\ &+ a_3(k)\{y(k-1) - y(k-2)\} + y(k-2) \end{aligned} \quad (14)$$

در معادله فوق پارامترهای $K_p(k)$ ، $K_i(k)$ و $K_d(k)$ به صورت زیر است

$$\begin{aligned} K_p(k) &= \frac{2a_2(k) + a_3(k) - 2}{a_1(k)} \\ K_i(k) &= \frac{1}{a_1(k)} \\ K_d(k) &= \frac{1 - a_2(k) - a_3(k)}{a_1(k)} \end{aligned} \quad (15)$$

هدف از طراحی کنترل کننده این است که خروجی مدل مرجع $G_m(z^{-1})r(k)$ را دنبال نماید. به عبارت دیگر، هدف از طراحی کنترل کننده کم کردن خطای $\varepsilon(k)$ بین خروجی مدل مرجع و خروجی سیستم به صورت (۱۶) است.

$$\varepsilon(k) = y(k) - G_m(z^{-1})\varphi(k) \quad (16)$$

که $G_m(z^{-1})$ تابع تبدیل مدل مرجع به صورت زیر تعریف می گردد [۳۱].

$$G_m(z^{-1}) = \frac{z^{-1}P(1)}{P(z^{-1})}$$

و $P(z^{-1})$ به صورت $p(z^{-1}) = 1 + p_1z^{-1} + p_2z^{-2}$ است. باجای گذاری معادله (۱۳) در معادله (۱۶) معادله (۱۷) و (۱۸) به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} \varepsilon(k) &= y(k) - G_m(z^{-1})\varphi(k) \\ &= y(k) - G_m(z^{-1})y(k-2) - G_m(z^{-1})\varphi^-(k) \end{aligned} \quad (17)$$

که در معادله (۱۷) ترم $\varphi^-(k)$ بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} \varphi^-(k) &= a_1(k)\Delta u(k) + a_2(k)\{y(k) - y(k-2)\} \\ &+ a_3(k)\{y(k-1) - y(k-2)\} \end{aligned} \quad (18)$$

برای تخمین پارامترهای کنترل کننده PID تطبیقی مدل مرجع بر اساس فیلتر کالمن از معادله (۱۷) و (۱۸) استفاده می‌شود.

۳-۲- فیلتر کالمن

فیلتر کالمن یک تخمین گر دقیق است و در بسیاری از تحقیقات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض کنید مدل سیستم به صورت زیر باشد.

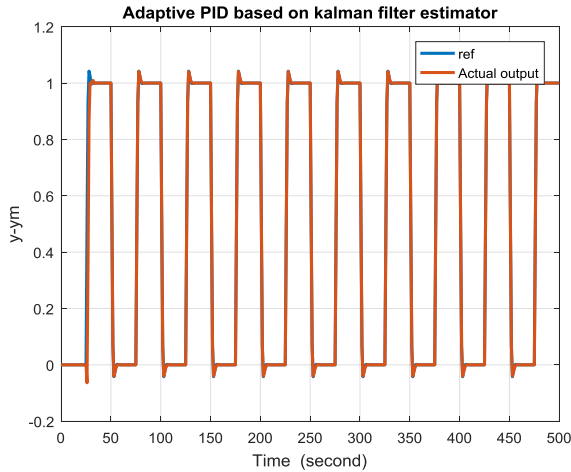
$$x(k+1) = A(k)x(k) + b(k)\{u(k) + \xi_v(t)\} \quad (19)$$

$$y(k) = c(k)x(k) + \xi_w(t) \quad (20)$$

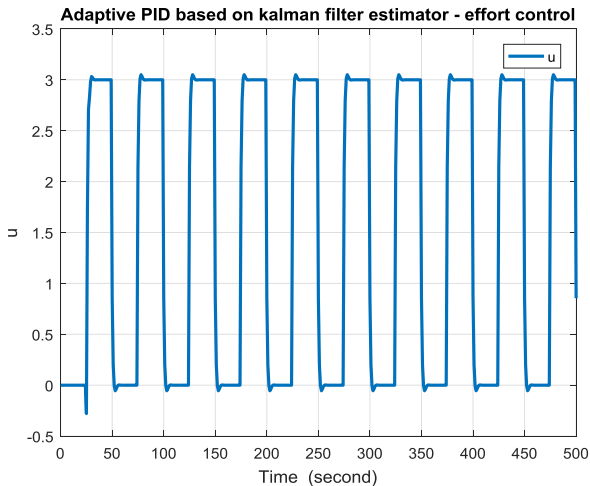
که $u(k)$ و $y(k)$ به ترتیب ورودی و خروجی سیستم و $x(k)$ بردار حالت، $A(k)$ ماتریس سیستم، و $c(k)$ ماتریس بردار اندازه گیری هستند. $\xi_v(t)$ و $\xi_w(t)$ به ترتیب نویز سیستم و نویز اندازه گیری هستند. همچنین فرض می‌شود این نویزها گوسی سفید و مستقل از هم باشند. علاوه براین میانگین و کواریانس هر نویز به صورت رابطه زیر است:

$$N(0, \delta_w^2), \quad N(0, \delta_v^2)$$

شکل (۶) که محور x نشان دهنده زمان شبیه سازی و محور y نتیجه ردیابی مدل سیستم نسبت به مدل مرجع را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، فیلتر به خوبی و با دقت زیاد عمل ردیابی را انجام داده‌است. همچنین شکل (۷) که محوره x نشان دهنده زمان شبیه سازی و محور y سیگنال کنترلی کنترل کننده PID براساس فیلتر کالمن را نشان می‌دهد. نمودار همگرایی پارامترهای کنترل کننده PID شامل K_p ، K_I و K_D در محور y شکل (۸) آورده شده‌است. پارامترها به خوبی همگرا شده‌اند.

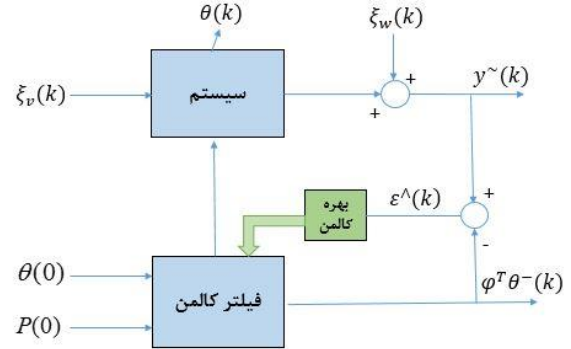


شکل (۶): کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی فیلتر کالمن در حالت بدون اغتشاش



شکل (۷): سیگنال کنترلی، کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن در حالت بدون اغتشاش

شکل (۵) الگوریتم اعمال شده به سیستم براساس فیلتر کالمن را نشان می‌دهد.



شکل (۵): الگوریتم اعمال شده به سیستم براساس فیلتر کالمن

فضای حالت کنترل پارامترهای تخمین به صورت زیر فرمول بندی می‌شوند.

$$\theta(k+1) = \theta(k) + b_{\xi_v}(k) \quad (30)$$

$$y^-(k) = G_m(z^{-1})\phi^T(k)\theta(k) + \xi_w(k) \quad (31)$$

$$y^-(k) = y(k) - G_m(z^{-1})y(k-2) \quad (32)$$

$$\phi(k) = [\Delta u(k)y(k) - y(k-2)y(k-1) - y(k-2)] \quad (33)$$

الگوریتم تخمین پارامترهای کنترل کننده به صورت زیر فرمول بندی شده‌است. مرحله اول $\theta(0)$ و مقدار دهی می‌شوند.

مرحله پیش بینی

$$\theta^{\wedge-}(k) = \theta^{\wedge-}(k-1) \quad (34)$$

$$P^-(k) = P(k-1) + \delta_v^2 b b^T \quad (35)$$

مرحله به روز رسانی

$$k(k) = \frac{P^-(k)\phi(k)}{\phi^T(k)P^-(k)\phi(k) + \delta_w^2} \quad (36)$$

$$\theta^{\wedge}(k) = \theta^{\wedge-}(k) + k(k)(y^-(k) - \phi(k)^T \theta^{\wedge-}(k)) \quad (37)$$

$$P(k) = (I - k(k)\phi^T(k))P^-(k) \quad (38)$$

پارامترهای کنترل کننده PID حاصل شده از الگوریتم اعمال شده به سیستم دو محوره به صورت جدول (۱) است.

۴- نتایج

در این بخش نتایج عملکرد کنترل کننده PID تطبیقی براساس فیلتر کالمن و الگوریتم‌های بهینه سازی در حالت آفلاین و آنلاین مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

۴-۱- عملکرد سیستم در حالت آفلاین

در این بخش، طراحی تطبیقی پارامترهای کنترل کننده PID براساس فیلتر کالمن در حالت آفلاین و بدون اغتشاش آورده شده‌است.

جدول (۱): طراحی مقادیر پارامترهای کنترل کننده PID با الگوریتم‌های بهینه‌سازی و فیلتر کالمن

الگوریتم	K_p	K_i	K_d
کرم شب‌تاب	۳۷/۷۶۳۱	۵/۵۶۴۴	۷/۶۰۸۱
فاخته	۲۱/۱۵۱۳	۹/۰۵۵۷	۴/۶۲۲۱
انبوه ذرات-ژنتیک	۲۲/۶۴۷۳	۱۳/۲۴۶۵	۵/۸۳۱۹
رقابت استعماری	۱۹/۷۹۲۴	۷/۱۶۱۳	۱/۶۳۹۰
فیلتر کالمن	۹/۶۰۱۴	۱/۸۱۳۷	۰/۴۳۵۳

جدول (۲): پارامترهای حلقه بسته سیستم ردیاب خورشیدی

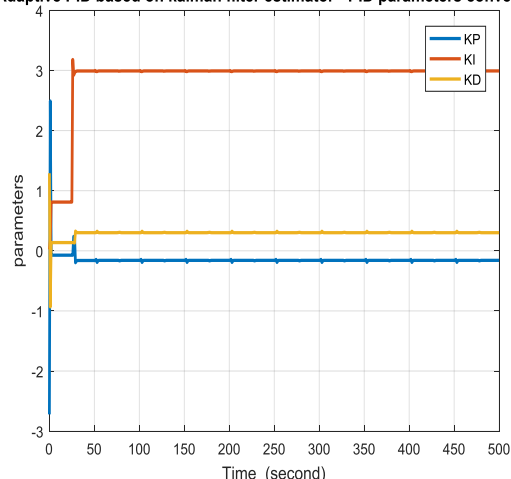
الگوریتم	MP	TS	SI	Maxrere al pole
کرم شب‌تاب	۱/۳۰۱۲	۰/۶۱۲۳	۰/۲۳۵۱	۴/۲۵۳۱
فاخته	۰/۷۰۳۲	۰/۶۰۷۸	۰/۷۸۶۱	۱/۲۷۲۱
انبوه ذرات- ژنتیک	۰/۳۳۴۹	۰/۸۳۴۲	۲/۲۴۳۱	۰/۴۴۵۸
رقابت استعماری	۰/۲۰۵۲	۰/۳۱۲۵	۲/۶۵۶۲	۰/۳۷۶۴
فیلتر کالمن	۰/۱۳۴۱	۰/۳۱۳۲	۲/۰۷۱۹	۰/۴۸۲۶

پارامترهای جدول شماره (۲) به ترتیب، MP فراجهش، TS زمان نشست سیستم، SI اندیس پایداری سیستم می‌باشند. که اندیس پایداری سیستم عکس جز حقیقی نزدیک ترین قطب به محور موهومی است. نتایج شبیه‌سازی مطابق جدول ۱ و ۲ نشان می‌دهد در حالت آفلاین فیلتر کالمن سیستم عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی داشته‌است. مطابق نتایج به دست آمده سیستم در حالت آفلاین با کنترل کننده PID تطبیقی بر اساس فیلتر کالمن و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به خوبی به پاسخ بهینه همگرا شده است.

۴-۲- عملکرد سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره در حالت آنلاین بدون اغتشاش

در این بخش به منظور حفظ پایداری سیستم در رفع عدم قطعیت و رفع اغتشاشات طبیعی در عین حال افزایش سرعت ردیابی، طراحی تطبیقی پارامترهای کنترل کننده PID مبتنی بر فیلتر کالمن و طراحی بهینه پارامترهای کنترل کننده PID آورده شده‌است. شکل (۱۰) عملکرد کنترل کننده PID بهینه برحسب تغییرات دامنه همگرایی در حالت آنلاین و ورود اغتشاش به سیستم را نشان می‌دهد. الگوریتم های بهینه سازی در حالت آفلاین به خوبی می‌توانند ضرایب کنترل کننده را تنظیم و طراحی نمایند. اما از آنجا که سیستم ما در طول روز و هنگام ردیابی دچار اغتشاشات از جمله خطای اندازه گیری و اغتشاشات طبیعی مانند ابر و باد می‌شوند و ماهیت این الگوریتم‌ها برای سیستم‌های تصادفی مقاوم نیست، در نتیجه هنگام ورود

Adaptive PID based on kalman filter estimator - PID parameters convergence



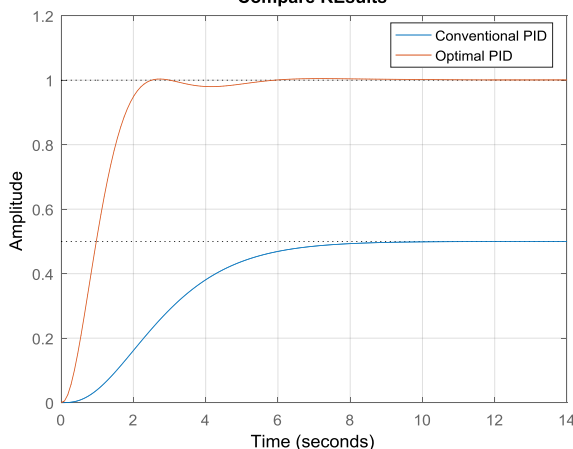
شکل (۸): نمودار همگرایی پارامترهای کنترل کننده PID مبتنی بر

فیلتر کالمن در حالت بدون اغتشاش

به منظور تنظیم پارامترهای کنترلی سیستم ردیاب خورشیدی مقایسه‌ای بین عملکرد کنترل کننده PID مبتنی بر فیلتر کالمن و کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حالت آفلاین و بدون اغتشاش انجام شده‌است. از الگوریتم های بهینه سازی کرم شب تاب، فاخته، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات-ژنتیک، الگوریتم رقابت استعماری و فیلتر کالمن جهت بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده PID استفاده گردیده‌است. همچنین، نتایج شبیه سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی و فیلتر کالمن در طول ۷ ساعت ردیابی در جدول (۱) و (۲) آورده شده‌است.

عملکرد سیستم برای سه مشخصه مهم تابع پله از جمله فراجهش، زمان نشست، و بازه اطمینان پایداری (فاصله آخرین قطب حلقه بسته تا محور موهومی) می‌باشد. در شکل (۹) نمودار همگرایی کنترل کننده بهینه برحسب تغییرات دامنه همگرایی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی در حالت آفلاین آورده شده‌است.

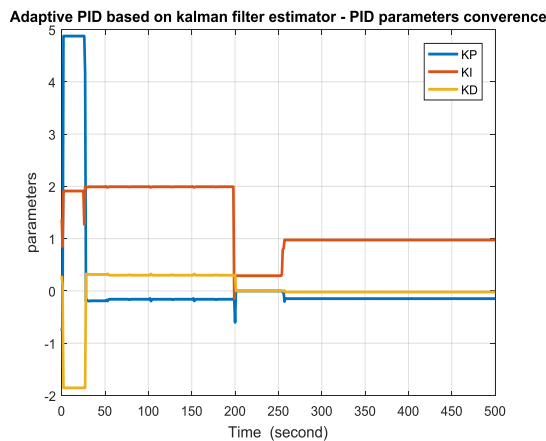
Compare Results



شکل (۹): نمودار همگرایی کنترل کننده PID بهینه توسط الگوریتم

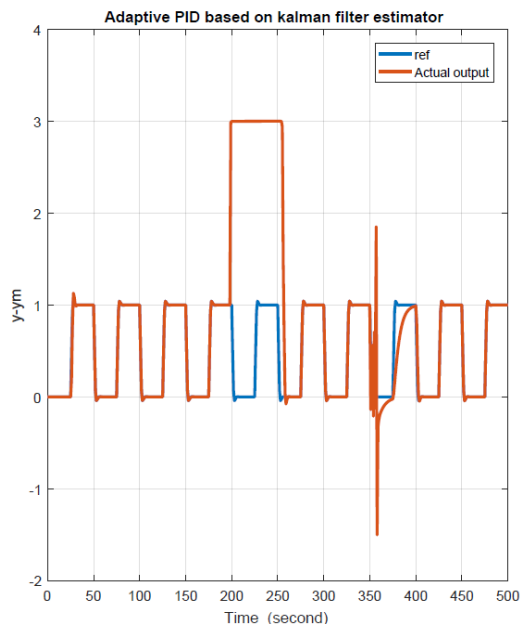
بهینه سازی در حالت بدون اغتشاش

همان طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود عدم قطعیت توسط کنترل‌کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن به سرعت از بین رفته است. سیگنال کنترلی سیستم با رفع اغتشاش به پایداری رسیده است، همچنین مدل سیستم به مدل مرجع میل نموده است و پارامترهای جدید کنترل‌کننده PID، K_p ، K_i و K_d مجدداً تنظیم شده‌اند.



شکل (۱۳): نمودار همگرایی پارامترهای کنترل‌کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن در حضور عدم قطعیت

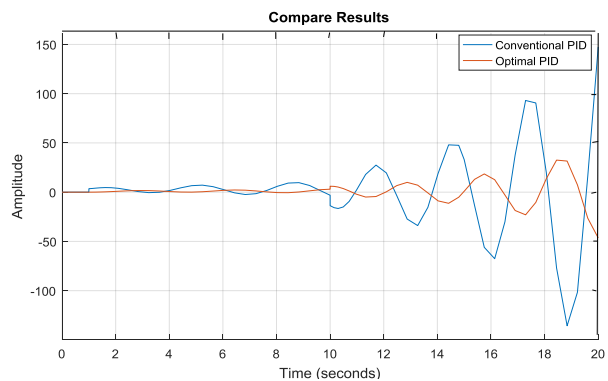
۳-۴- عملکرد سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره در حالت آنالین در حضور اغتشاش



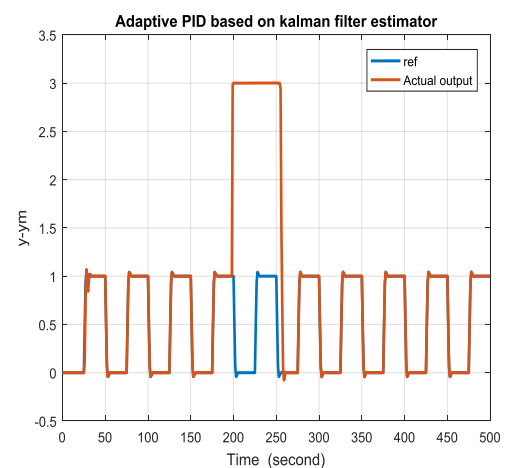
شکل (۱۴): کنترل‌کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن با حضور عدم قطعیت و اغتشاش

به منظور کنترل دقیق و اطمینان از پایداری سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره در شرایط محیطی متفاوت، کنترل‌کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن در حضور عدم قطعیت و اغتشاش مورد بررسی

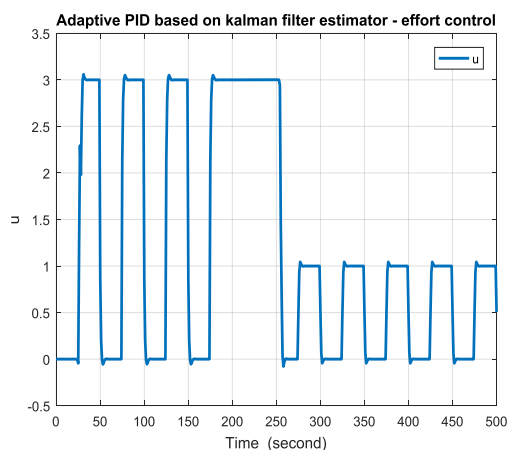
اغتشاش، نمی‌تواند سیستم را کنترل نمایند و سبب ناپایداری سیستم می‌شوند.



شکل (۱۰): نمودار کنترل‌کننده PID بهینه با الگوریتم بهینه‌سازی در حالت با اغتشاش



شکل (۱۱): کنترل‌کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن در حضور عدم قطعیت

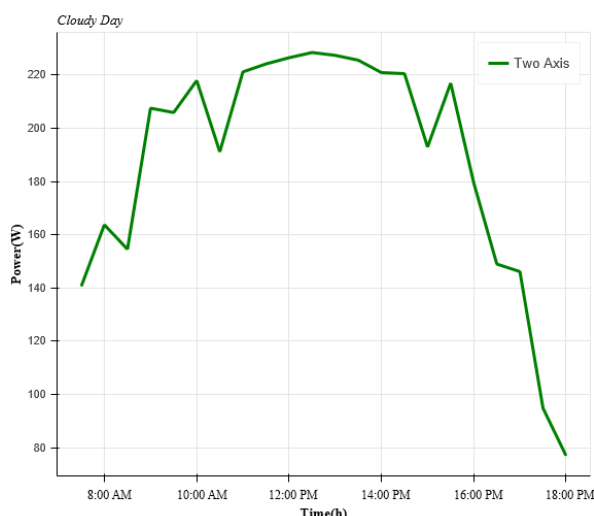


شکل (۱۲): سیگنال کنترلی، کنترل‌کننده PID تطبیقی مبتنی بر

فیلتر کالمن در حضور عدم قطعیت

شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) در حضور عدم قطعیت می‌باشند. عدم قطعیت در ثانیه ۲۰۰ به سیستم اعمال شده است. این عدم قطعیت می‌تواند ناشی از ناهمخوانی مدل با واقعیت سیستم به وجود آید.

یک روز نیمه ابری را نشان می‌دهد مطابق نتایج حاصل شده، سیستم با رفع اغتشاش ناشی از ابرحداکثر توان از محیط را دریافت نموده است.



شکل (۱۷): توان دریافتی سیستم در یک روز نیمه ابری

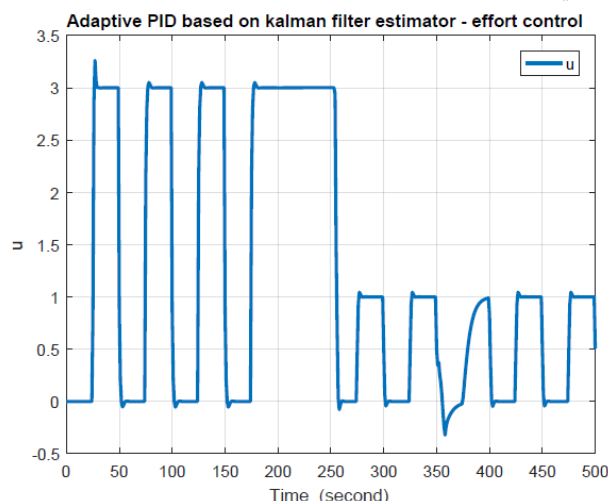
در طول ۱۴ ساعت ردیابی، انرژی مصرفی موتورها برابر ۳/۲۵ وات بر ساعت می‌باشد. ولی با توجه به اینکه در طول روز ۷ ساعت آفتاب موثر وجود دارد، نتایج حاصل از انرژی مصرفی موتورها و توان تولیدی با روش کنترلی PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن بر اساس متوسط ۷ ساعت دریافت توان در جدول (۳) آورده شده‌است. مطابق نتایج بدست آمده از توان دریافتی در هر سه حالت ثابت، یک محوره و دو محوره برای هر ساعت محاسبه شد و مطابق آن متوسط توان در هر حالت در طول ۷ ساعت مطابق جدول زیر حاصل شد.

جدول (۳): متوسط توان دریافتی و توان مصرفی موتورها در سه حالت ثابت، یک محوره و دو محوره

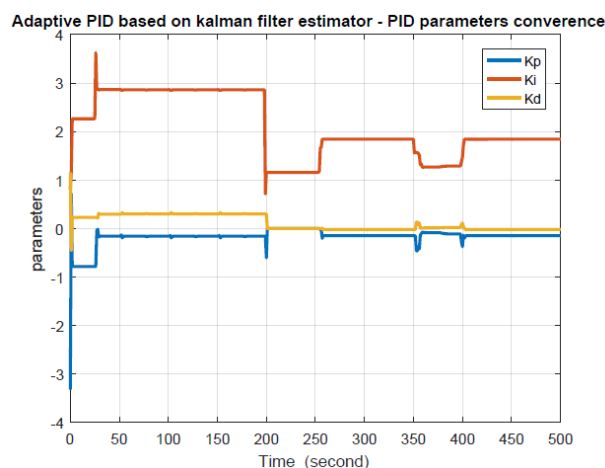
توان	در حالت ثابت	در حالت یک محوره	در حالت دو محوره
متوسط توان دریافتی در ۷ ساعت	۱۸۴/۳۸۳۷ (wh)	۲۱۷/۷۵۶۷ (wh)	۲۲۶/۷۰۶ (wh)
انرژی مصرفی موتورها	۰ (wh)	۱،۰۶ (wh)	۱،۱۲ (wh)

در حالت ثابت چون موتور حرکت نمی‌نماید و پیل مستقیم جلوی خورشید قرار دارد بنابراین انرژی مصرفی موتور برابر ۰ و در حالت یک محوره برابر ۱/۰۶ وات بر ساعت می‌باشد. برای چرخاندن دو محور پیل و قرار گرفتن صفحات در مقابل نور خورشید از دو موتور ۲۴ ولت استفاده شده است که در ماکزیمم حالت خود ۴ آمپر مصرف می‌نمایند. همچنین موتور در هر یک ساعت ۳ ثانیه حرکت خواهد

قرار گرفته‌است. اغتشاش به صورت یک نویز گوسی با میانگین ۰ و واریانس ۱ در لحظه $350 < T < 360$ به مدت ۱۰ ثانیه به خروجی سیستم اعمال شده است. شکل های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) به ترتیب نتیجه ردیابی نسبت به مدل مرجع، سیگنال کنترلی و نمودار همگرایی پارامترهای کنترل کننده PID مبتنی بر فیلتر کالمن به ترتیب K_p ، K_i و K_d می‌باشند. مطابق نتایج بدست آمده اثر عدم قطعیت و اغتشاش وارد شده بر خروجی سیستم توسط کنترل کننده PID مبتنی بر فیلتر کالمن برطرف شده و ردیابی به صورت پایدار ادامه یافته‌است.



شکل (۱۵): سیگنال کنترلی، کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن در حضور عدم قطعیت و اغتشاش



شکل (۱۶): نمودار همگرایی پارامترهای کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن در حضور عدم قطعیت و اغتشاش

۴-۴- انرژی مصرفی موتورها و توان تولیدی در روزهای نیمه ابری و آفتابی با روش کنترل تطبیقی PID توسط فیلتر کالمن

آزمایشات طی چندین مرحله در روزهای متوالی، برای روزهای نیمه ابری و آفتابی انجام شده‌است. شکل (۱۷) توان دریافتی از سیستم در

نیمه ابری و آفتابی آورده شده است. کنترل کننده تطبیقی PID مبتنی بر فیلتر کالمن موجب افزایش ۳۷,۳ درصدی دریافت توان نسبت به حالت ثابت با یک محور متحرک و افزایش ۴۹,۷ درصدی دریافت انرژی نسبت به حالت ثابت با دو محور متحرک شده است.

مراجع

- [1] S. Ozlu, I. Dincer, "Analysis and evaluation of a new solar energy-based multigeneration system", *International Journal of Energy Research*, Vol.40, PP. 1339-1354, 2016.
- [2] S. Seme, G. Stumberger, J. Vorsic, "Maximum efficiency trajectories of a two-axis sun tracking system determined considering tracking system consumption", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.26, PP.1280-1290, 2011.
- [3] M. Filomeno, P. Vieira, S. Moura, T. Anibal, de Almeida, "Energy storage system for self-consumption of photovoltaic energy in residential zero energy buildings", *Renewable Energy*, Vol.103, PP. 308-320, 2017.
- [4] A. M. Zegaoui, P. Aillerie, J. P. Petit, J. P. Sawicki, A. Charles, W. Belarbi, "Dynamic behaviour of PV generator trackers under irradiation and temperature changes", *Solar Energy*, Vol.85, PP. 2953-2964, 2011.
- [5] Sadeghi S. Design and analysis of a 30 kV photovoltaic grid connected system using pvsyst software. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2023; 20 (4) :47-54.
- [6] Abolghasempour H, Razi-Kazemi A A. Transient modeling of photovoltaic system (PV) to investigating the peak of transient voltage generated by direct and indirect lightning strikes. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2023; 20 (2) :159-169
- [7] L. Serrano-Lujan, N. Espinosa, J. Abad, A. Urbina, "He greenest decision on photovoltaic system allocation", *Renewable Energy*, 1348-1356, 2017.
- [8] R. Carvalho, A. Lacerda Filho, P. Resende Possi, J. Kruckeberg, "An economical, two axes solar tracking system for implementation in Brazil", *Applied Engineering in Agriculture*, VOL. 29, NO. 2, PP.123-128, 2013.
- [9] Y. Yao, Y. Hu, S. GAO, G. Yang, J. Du, "A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies", *Renewable Energy*, Vol.72, PP. 88, No.98, 2014.
- [10] J. M. Oh, Burhan, K. C. Ng, Y. Kim, W. Chun, "Development and performance analysis of a two-axis solar tracker for concentrated photovoltaics", *International Journal of Energy Research*, Vol.39, PP.965-976, 2015.
- [11] C. Lazaroiu, M. Longo, M. Roscia, M. Pagano, "Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption. *Energy Conversion and Management*", Vol.92, PP.143-148, 2015.
- [12] A. AliMohamad, "Efficiency improvements of photovoltaic panels using a Sun-tracking system", *Applied Energy*, Vol.79, PP. 345-354, 2004.
- [13] P. Roth, A. Georgiev, H. Boudinov, "Cheap two axis sun following device. *Energy Conversion and Management*", Vol. 46, PP.1179-1192, 2005.
- [14] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, A. Abrinia, K. Sharifi. "A review of principle and sun-

نمود بنابراین انرژی مصرفی موتورها در طول یک ساعت به شرح زیر می باشد.

$$E = \frac{(24 \times 4 \times 3) \times 2}{3600} = 0.16 \text{ wh}$$

با توجه به میانگین ۷ ساعت تابش خورشید در یک روز، بنابراین ۷ برابر مقدار حاصل شده از فرمول انرژی مصرفی موتورها در طول یک روز می باشد، از طرفی اولین ردیابی در روز و بدترین شرایط ۱۹ ثانیه می باشد. منظور از بدترین شرایط (از زمانی که سیستم پشت به خورشید است تا زمانی که در مقابل خورشید قرار می گیرد) که با جمع این میزان رابطه زیر بدست خواهد آمد.

$$E = (0.16 \times 7) + \frac{(24 \times 4 \times 19 \times 2)}{3600} = 1.12 \text{ wh}$$

انرژی مصرفی موتورها نسبت به توان دریافتی بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است. دریافت توان از پنل با یک محور متحرک نسبت به حالت ثابت، افزایش ۳۷,۳ درصدی داشته است. همچنین دریافت توان از سیستم با دو محور متحرک نسبت به حالت ثابت افزایش ۴۹,۷ درصدی داشته است.

نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور حفظ پایداری سیستم در مقابل اثرات طبیعی و اغتشاشات وارد شده بر سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره، کنترل کننده PID تطبیقی با استفاده از مدل مرجع به سیستم اعمال گردیده است. پارامترهای کنترل کننده تطبیقی بر اساس فیلتر کالمن تنظیم و طراحی شده است. کنترل کننده PID تطبیقی سیستم در دو حالت آفلاین و آنلاین مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت آفلاین از فیلتر کالمن و چهار الگوریتم کرم شب تاب، فاخته، انبوه ذرات-ژنتیک و الگوریتم رقابت استفاده گردیده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد در حالت آفلاین کنترل کننده PID تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن و الگوریتم های بهینه سازی به طور دقیق پارامترهای کنترل کننده را تنظیم و طراحی نموده و سیستم را کنترل نمایند. مطابق نتایج بدست آمده در حالت آفلاین فیلتر کالمن عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم ها داشته است. در حالت آنلاین و اعمال عدم قطعیت و اغتشاش به سیستم کنترل کننده بهینه شده مبتنی بر الگوریتم های بهینه سازی عملکرد مناسبی نداشته و سبب ناپایداری سیستم گردیده است. و این ناپایداری موجب آسیب رساندن به سیستم می شود. الگوریتم فیلتر کالمن در هر دو حالت به خوبی عمل ردیابی را انجام داده است. در حالت آنلاین با اعمال عدم قطعیت و اغتشاش به سیستم، کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر فیلتر کالمن در مدت زمان بسیار کوتاه توانسته عدم قطعیت و اغتشاش را رفع و سیستم را به پایداری برساند. نتایج آزمایشات عملی، سرعت ردیابی سیستم، توان تولیدی توسط سیستم و انرژی مصرفی موتورها با بکارگیری کنترل کننده تطبیقی PID توسط فیلتر کالمن طی آزمایشات در روزهای متوالی

based on the Augmented Output”, CINCO (1), -
scitepress.org 2019.

زیر نویس ها

¹ Partical swarm optimization

² Taguchi

³ Fire flay algorithm

⁴ Cuckoo search algorithm

⁵ Perturb and observe

⁶ Imperialism competitive algorithm

⁷ Cost of energy

⁸ Genetic Algorithm-Particle Swarm Optimization

⁹ Multiple objective particle swarm optimization

tracking methods for maximizing solar systems output”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, PP, 11800–1818, 2009.

[15] H. Fathabadi, “Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers”, Solar Energy, Vol.138, PP.67-76, 2016.

[16] Y. Away, M. Ikhsan, “Dual-axis sun tracker sensor based on tetrahedron geometry. Automation in Construction”, Vol.73, PP.175-183, 2017.

[17] M. Abdollahpour, M. R. Golzarian, A. Rohani. Hossein, A. Zarchi, “Development of a machine vision dual-axis solar tracking system”, Solar Energy, Vol. 196, PP.136-143, 2018.

[18] F- M. Hoffmann, R-F. Molz, J- V. Kothe, E- O- B. Nara, L P- C. Tedesco, “Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels”, [Renewable Energy, Vol.115, PP.750-759, 2017.

[19] J.-H. Chen, H.-T. Yau, and T.-H. Hung, “Design and implementation of FPGA-based Taguchi-chaos-PSO sun tracking systems”. Mechatronics, Vol.25, PP. 55-64, 2015.

[20] MI. Solihin, K- ML. Tack LF, “Tuning of PID controller using particle swarm Optimization (PSO)”, Int Conf Adv Sci, Vol. 1, PP.458–61, 2011.

[21] M-M. Sabir, A. Tariq, “Optimal PID controller design through swarm intelligence algorithms for sun tracking system”, pplied Mathematics and Computation Vol.274, PP.690–699, 2016.

[22] Ch. wari, seyezhai. “PSO-PID Maximum Power Point Tracking Controller Using Modified Superlift Luo Converter”, Energy procedia, Vol.117, PP, 87-94. 2017

[23] D. Liang, L. Xiyuan, D. Bo, L. Yuanchun, “Experimental Investigation on Fuzzy PID Control of Dual Axis Turntable Servo System”, Procedia Computer, Vol.131, PP.531-540, 2018.

[24] A. Fathy, H. Rezk, “Parameter Estimation of Photovoltaic 1 System Using Imperialist Competitive Algorithm”, Renewable Energy, Vol.111, PP.307-320, 2017

[25] Y. Sawle, S. Aashi Kumar Bohre, Gupta C. “Optimal sizing of Standalone pv/wind/ Biomass hybrid Energy System using GA and PSO optimization”, technique. Energy procedia, Vol.117, PP. 690-698. 2017.

[26] B. Jovanovic, “Kalman filter estimation of the unrecorded economy in Macedonia”, Nation There are no sources in the current document. al Bank of the Republic of Macedonia Working Papers, 2015.

[27] B. Grazia, and M. David, “A photovoltaics-aided interlaced extended Kalman filter for distribution systems state estimation”, Sustainable Energy, Grids and Networks Vol.26, 2021.

[28] S. Motahhir, A. Aoune, and A. Deroich, “Comparison between Kalman filter and incremental conductance algorithm for optimizing photovoltaic energy”, Springer, Vol.8, 2017.

[29] B. Tarek, D. Said, and C-Al. Larbi, “Experimental control of photovoltaic system using neuro – Kalman filter maximum power point tracking (MPPT) technique”, Int. J. Emerg. Electr. Power Syst. Vol., 21, 2020.

[30] Babaei. “Using the modified particle swarm optimization algorithm to adjust the PID controller parameters”, National Conference of Electrical Engineering, Khavaran Higher Educational Institute of Mashhad, 2012.

[31] Y. Ashida, S. Wakitani, T. Yamamoto, “Design of a Self-tuning Predictive PI Controller for Delay Systems