بهینه‌سازی الگوریتم کنترلی اینورتر سیستم فتوولتاییک تک طبقه تحت شرایط شبکه فشارضعیف با بهره‌گیری از کنترل‌کننده PI فازی

پریسا کلاه‌کج[۱]، ابراهیم آقاجری*[۲]، سیدمحسن سیدموسوی[۳]

۱- کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، parisa_kolahkaj@iauahvaz.ac.ir
*۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، aghajari@iauahvaz.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران،m.moosavi@srbiau.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۹ تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۹/۰۲۹

چکیده: امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت زیادی پیدا کرده‌است. با توجه به تغییرات شدت تابش و کلیدزنی پیوسته اینورتر، الگوریتم کنترلی مبدل نقش مهمی دارد. در بخش DC تنظیم ولتاژ لینک DC اهمیت زیادی دارد و تثبیت ولتاژ در این نقطه تاثیر بسزایی بر عملکرد کل سیستم خواهد داشت. در روش‌های موجود به منظور تنظیم ولتاژ، از کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی (PI) استفاده می‌شود و ضرایب این کنترل‌کننده بطور معمول بصورت ثابت تعریف شده و با تغییر شرایط کاری، عملکرد آن افت می‌کند، لذا بکارگیری ساختارهایی با رویکرد فازی قابل ملاحظه است. استفاده از کنترل‌کننده PI فازی، باعث بهبود عملکرد کنترل‌کننده، افزایش سرعت محقق شدن الگوریتم ردیابی حداکثر توان، کاهش نوسانات ولتاژ لینک DC و توان خروجی اینورتر سیستم فتوولتاییک می‌گردد. در این مقاله یک ساختار جدید مبتنی بر کنترل‌کننده PI فازی در جهت بهبود عملکرد الگوریتم کنترلی اینورتر ارائه شده است، به نحوی که ولتاژلینک DC به مدت ۲ ثانیه سریع‌تر از روش PI معمولی برابر با مقدار مرجع شده و دامنه ولتاژ شبکه به مدت ۱/۵ ثانیه و توان اکتیو شبکه نیز ۲ ثانیه سریع‌تر به حالت ماندگار رسیده است و نوسان این متغیرها نیز به طرز چشمگیری کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، سیستم فتوولتاییک، کنترل‌کننده فازی، کنترل‌کننده PI

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از منابع فتوولتاییک نسبت به سایر انرژی های تجدیدپذیر رشد بیشتری داشته است. استفاده روزافزون از منابع فتوولتاییک به عنوان یک منبع انرژی الکتریکی پاک سبب شده است تا تمرکز بیشتری بر روی بهینه‌سازی و توسعه ساختارها و روش‌های کنترل این سیستم‌ها صورت گیرد. علاوه بر این، با افزایش حضور منابع فتوولتاییک در سیستم های توزیع، تاثیر منابع فتوولتاییک بر روی شبکه‌های فشارضعیف نیز بیشتر شده است به نحوی که، می‌تواند افزایش نوسانات توان یا ولتاژ و در نهایت افت کیفیت توان در این شبکه‌ها را به دنبال داشته باشد[۱]. سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه از تعدادی سلول فتوولتاییک و یک مبدل الکترونیک قدرت که مجهز به توابع کنترلی مختلف است،تشکیل شده‌اند. برای تبدیل توان دریافتی از سلول فتوولتاییک به توان قابل تزریق به شبکه از مبدل الکترونیک قدرت استفاده می‌کنند، به همین دلیل مسأله کیفیت توان در این نوع از سیستم‌ها اهمیت دوچندانی دارد. استخراج حداکثر توان با استفاده از الگوریتم‌های ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) انجام می‌شود. پیاده‌سازی این الگوریتم در سیستم‌های فتوولتاییک، به ساختار سیستم‌ها بستگی دارد. بیشتر ساختارهای ارائه شده برای سیستم‌های فتوولتاییک دو طبقه است که در آنها ابتدا الگوریتم MPPT از طریق یک مبدل DC/DC پیاده‌سازی شده و در ادامه نیز توان تولیدی از طریق یک اینورتر به شبکه تزریق می‌شود. با این وجود اهداف مذکور را تنها با استفاده از یک اینورتر نیز می‌توان انجام داد که به این

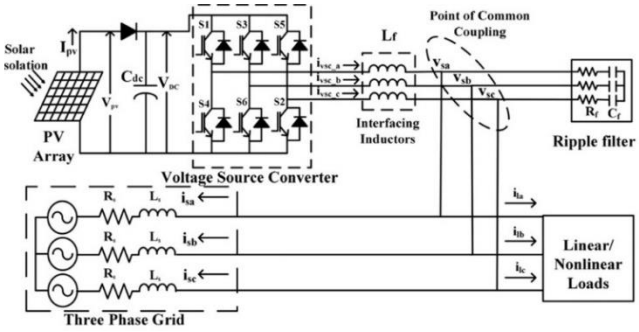
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022

ساختارها، ساختارهای تک طبقه گفته می‌شود. استفاده از ساختار تک طبقه مزیت‌های فروانی نسبت به نوع دو طبقه دارد که مهمترین آنها کاهش تعداد المان‌های سیستم (نظیر دیود، کلید و خازن)، کاهش وزن، پیچیدگی، هزینه سیستم وکاهش تلفات انرژی است. با وجود مزایای بیان شده برای ساختار تک طبقه، کنترل این پیکربندی پیچیدگی زیادی دارد، زیرا تمامی اهداف کنترلی باید از طریق یک اینورتر پیاده‌سازی شود که با استفاده از اینورتر فتوولتاییک به عنوان یک فیلتر فعال، موجب افزایش پیچیدگی سیستم کنترلی می‌شود[۲]. تکنیک‌های MPPT از نظر پیچیدگی، سرعت همگرایی و دقت مقایسه شده‌اند[۵-۳]. روش‌های MPPT از نظر میزان مقبولیت آنها در کاربردهای واقعی و صنعتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بسیاری از روش‌های MPPT ارائه شده، برای سیستم‌های فتوولتاییک دو طبقه طراحی شده است. در نتیجه این الگوریتم‌ها تنها قابلیت پیاده‌سازی بر روی یک مبدل DC/DC را دارند[۳]. درخصوص اهمیت مدولاسیون پهنای پالس سینوسی برای بهبود عملکرد سیستم فتوولتاییک مبتنی بر اینورتر تک طبقه بحث شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که به‌کارگیری مدولاسیون پهنای پالس سینوسی و استفاده از ساختارهای تک طبقه منجر به کاهش تلفات سیستم می‌شود[۲]. یک استراتژی کنترلی برای سیستم‌های فتوولتاییک ارائه شده است که ضمن تضمین استخراج حداکثر توان، قادر به بهبود مدیریت توان تولیدی، جبران‌سازی توان راکتیو و بهبود کیفیت توان سیستم‌های فتوولتاییک است. این روش بر روی سیستم های فتوولتاییک مقیاس بزرگ متصل به شبکه شامل یک اینورتر و تعدادی مبدل DC/DC پیاده‌سازی شده است. در این روش اولویت کنترلی، بیشینه‌سازی تولید و سپس بهبود کیفیت توان است. بهبود کیفیت توان از طریق حذف هارمونیک‌های ناشی از بارهای غیرخطی در نقطه اتصال مشترک (PCC) انجام می‌شود. الگوریتم بهبود کیفیت توان از طریق اینورتر پیاده‌سازی شده و مبدل‌های DC/DC نیز برای پیاده‌سازی الگوریتم MPPT استفاده شده است. این روش نیز ضعف روش‌های دو طبقه را دارد[۶]. یک روش کنترلی جدید برای سیستم‌های فتوولتاییک تک طبقه متصل به شبکه سه فاز با استفاده از فیلتر انطباقی حداقل اختلاف مطلق لگاریتمی (LLAD) با الگوریتم MPPT مبتنی بر آشوب و مشاهده (P&O) ارائه شده است. در این روش از کنترل‌کننده PI استفاده شده است و همین موضوع سبب شده است تا قابلیت محدودی در پاسخ‌گویی به تغییرات شدت تابش داشته باشد[۷].

در این مقاله یک ساختار مبتنی بر کنترل‌کننده PI فازی ارائه شده است که با تعیین ضرایب کنترل‌کننده PI بصورت فازی، باعث افزایش سرعت پاسخ‌گویی سیستم می‌گردد. علاوه برآن ساختار پیشنهاد شده باعث افزایش سرعت محقق شدن ردیابی حداکثر توان و کاهش نوسانات ولتاژ و توان خروجی می‌گردد. ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در قسمت دوم پیکربندی سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه بیان شده است. در قسمت سوم الگوریتم کنترل‌کننده PI معمولی و کنترل‌کننده پیشنهادی ارائه شده است و در قسمت چهارم و پنجم نیز به ترتیب شبیه سازی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲-پیکربندی سیستم

سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه متشکل از سه بخش اصلی شامل شبکه، بار خطی یا غیرخطی و یک آرایه PV است، که از طریق یک اینورتر به شبکه سه فاز متصل می‌شود. برای حذف هارمونیک‌های جریان و ولتاژ ناشی از کلیدزنی اینورتر نیز از یک فیلتر سلفی-خازنی-مقاومتی استفاده شده است. ساختار سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه در شکل (۱) آمده است.



شکل (۱): ساختار سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه [۷]

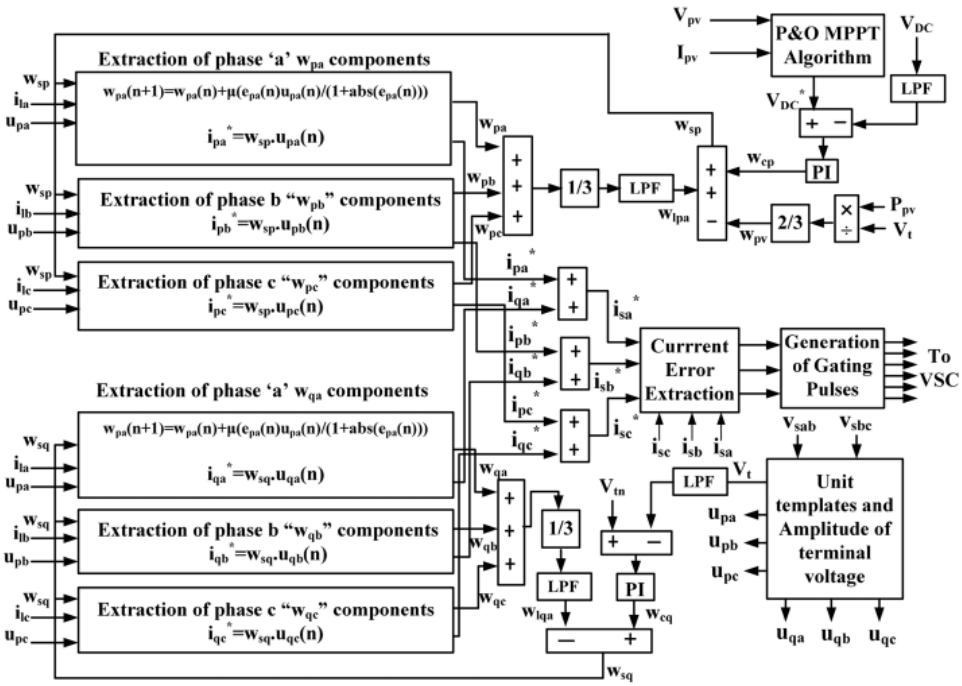
۳- الگوریتم کنترلی

در شکل (۲) ساختار کلی کنترل‌کننده با استفاده از کنترل‌کننده PI معمولی نشان داده شده است. الگوریتم کنترلی شامل الگوریتم MPPT و الگوریتم سوئیچینگ اینورتر است. الگوریتم MPPT مبتنی بر آشوب و مشاهده برای تولید ولتاژ مرجع استفاده شده است. روندنمای مبتنی بر آشوب و مشاهده در شکل (۳) نشان داده شده است. دقت این روش به اندازه آشوب (افزایش یا کاهش ولتاژ) بین هر دو اندازه‌گیری بستگی دارد که با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان آرایه شروع می‌شود. پس از آن توان و تغییرات توان محاسبه می‌گردد، در صورت مثبت بودن تغییرات ولتاژ و توان، تغییرات در همان جهت قبلی ادامه می‌یابد تا زمانی که به نقطه حداکثر توان برسد. پس از آن با توجه به افت توان و دور شدن از نقطه حداکثر توان، کنترل‌کننده با کاهش ولتاژ، نقطه کار را به حالت قبلی بر می‌گرداند و بین دو نقطه ولتاژی در دو سمت نقطه حداکثر توان، نوسان می‌کند. خروجی کنترل‌کننده MPPT همان ولتاژ مرجع است. طبق شکل (۲)، ولتاژ DC اندازه‌گیری شده از ولتاژ DC مرجع کم می‌شود و حاصل تفریق به کنترل‌کننده PI معمولی داده می‌شود[۷].

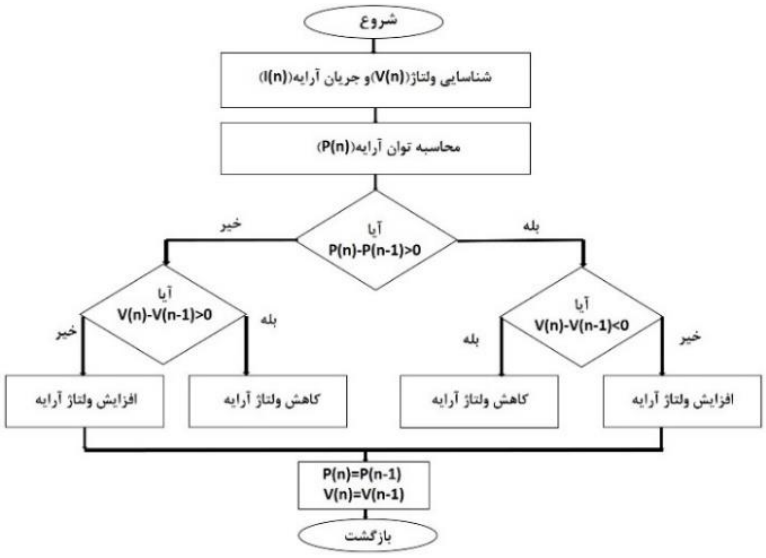
۳-۱- الگوریتم کلیدزنی مبدل منبع ولتاژ

مطابق با شکل (۲) برای کنترل دامنه ولتاژ ترمینال (V_t)، مقدار اندازه‌گیری شده با یک مقدار مرجع ثابت (V_{tn}) مقایسه شده و خطای به‌دست آمده به یک کنترل‌کننده PI داده می‌شود. این فرآیند با چالش مهمی همراه نیست، زیرا مقدار مرجع دامنه ولتاژ (V_{tn}) یک عدد ثابت بوده و کنترل‌کننده PI قادر به ردیابی آن است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022



شکل (۲): ساختار کنترل‌کننده PI معمولی[۷]



شکل (۳): روندنمای MPPT مبتنی بر P&O [۷]

۳-۲- برآورد دامنه ولتاژ شبکه

دامنه ولتاژ شبکه از طریق ولتاژ های فاز شبکه استخراج می‌گردد. دامنه ولتاژ شبکه یعنی V_t بر اساس ولتاژهای فاز که با نام V_s مشخص شده اند طبق رابطه (۱) که از مرجع [۷] اتخاذ شده است، محاسبه می‌شود.

$$v_t = \sqrt[2]{\frac{2}{3}\left(V_{Sa}^2 + V_{S_b}^2 + V_{Sc}^2\right)} \qquad (۱)$$

۳-۳- برآورد مولفه‌های واحد ولتاژ

استخراج مولفه‌های واحد ولتاژ در محورهای p و q بر اساس دامنه ولتاژ شبکه و ولتاژهای فاز، به ترتیب طبق رابطه (۲) از مرجع [۷]، محاسبه شده است.

$$u_{p_a} = \frac{v_{sa}}{v_t}\ ,\ \ u_{p_b} = \frac{v_{sb}}{v_t}\ , u_{qa} = -\frac{u_{pb}}{\sqrt{3}} + \frac{u_{pc}}{\sqrt{3}}$$
$$u_{qb} = \frac{\sqrt{3}u_{pa}}{2} + \frac{u_{pb} - u_{pc}}{2\sqrt{3}} \qquad (۲)$$
$$u_{qc} = -\frac{\sqrt{3}u_{pa}}{2} + \frac{u_{pb} - u_{pc}}{2\sqrt{3}}$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022

۳-۴- وزن مولفه‌های اکتیو و راکتیو جریان بار

هدف از این بخش محاسبه جریان مرجع شبکه برای هر فاز در محورهای p و q است. در این روش برای تخمین دامنه مولفه‌های اصلی جریان بار از روش حداقل اختلاف مطلق لگاریتمی استفاده می‌شود که از خانواده فیلترهای تطبیقی بوده و برای تخمین متغیرهای حالت یک سیستم استفاده می‌شود. در روش مذکور مقدار تخمین زده شده برای یک سیگنال در پله زمانی n+1 بر اساس رابطه زیر به‌دست می‌آید. در این رابطه $w_{pa(n)}$ مقدار تخمین زده شده برای پله زمانی n بوده، μ اندازه پله تغییرات و e_{pa} خطای تخمین در پله زمانی فعلی است. مقدار دامنه مولفه اصلی جریان فاز a (w_{pa}) در پله زمانی n+1 و در محور p مطابق رابطه (۳) و مقدار دامنه مولفه اصلی جریان فاز a (w_{qa}) در پله زمانی n+1 و در محور q مطابق رابطه (۴) به‌دست می‌آید. شایان ذکر است که روابط از مرجع [۷] اتخاذ شده‌اند.

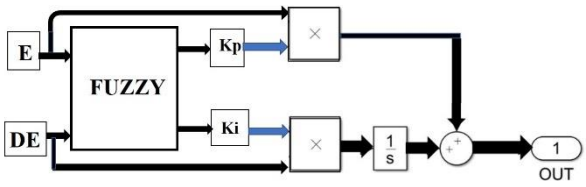
$$\omega_{pa}(n+1) = \omega_{pa}(n) + \mu_{\times}\frac{e_{pa}(n)\times u_{pa}(n)}{1+|e(n)|} \qquad (۳)$$
$$e_{pa}(n) = i_{la}(n) - u_{pa}(n)\times\omega_{pa}(n)$$

$$\omega_{qa}(n+1) = \omega_{qa}(n) + \mu_{\times}\frac{e_{qa}(n)\times u_{qa}(n)}{1+|e(n)|} \qquad (۴)$$
$$e_{qa}(n) = i_{la}(n) - u_{qa}(n)\times\omega_{qa}(n)$$

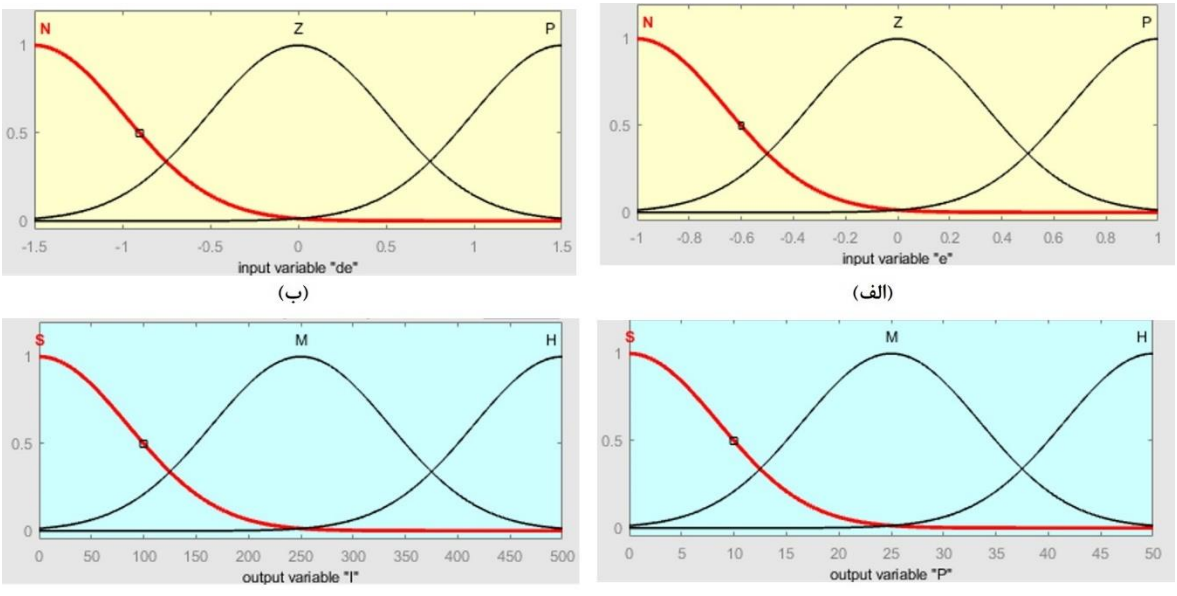
۳-۵- مدل کنترل‌کننده پیشنهادی

برای تنظیم ولتاژ لینک DC، مقدار اندازه‌گیری شده آن با مقدار مرجع (V_{DC}^*) که از MPPT بدست می‌آید مقایسه می‌شود. با توجه به اینکه مقدار V_{DC}^* متغیر بوده و توسط الگوریتم ردیابی حداکثر توان (MPPT) مشخص می‌شود، تنظیم ولتاژ لینک DC با چالش بیشتری همراه است. این در حالی است که سرعت محقق شدن MPPT، به سرعت ردیابی V_{DC}^* بستگی دارد. بنابراین چنانچه مقدار V_{DC} به سرعت به مقدار V_{DC}^* نرسد، الگوریتم MPPT دچار خطا می‌شود و تنظیم ولتاژ DC به درستی انجام نمی‌شود. علاوه بر این، نوسان ولتاژ لینک DC موجب نوسان توان اکتیو و راکتیو خروجی اینورتر PV نیز می‌شود که افت کیفیت توان سیستم را به همراه دارد. بنابراین لازم است دقت و سرعت تنظیم ولتاژ V_{DC} افزایش یابد. به این منظور در این پژوهش به جای کنترل‌کننده PI معمولی، از یک کنترل‌کننده PI فازی استفاده شده است. بر اساس ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی که در شکل (۴) نشان داده شده است، ضرایب کنترل‌کننده PI یعنی K_p و K_i بصورت تطبیقی توسط سیستم فازی و بر اساس مقدار خطا و مشتق خطا محاسبه می‌شود. این روش سبب می‌شود که کنترل‌کننده PI همواره با شرایط کاری سیستم تطبیق یافته و پاسخ سریع‌تر و دقیق‌تری نسبت به تغییرات شدت تابش داشته باشد. خطا و مشتق خطا، ورودی های سیستم فازی می‌باشند. در شکل (۵) توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی‌های کنترل‌کننده فازی پیشنهادی نشان داده شده است. قوانین کنترل کننده فازی در جدول (۱) بر اساس دانش خبره و بر اساس مقادیر کمینه-بیشنه خطا و تغییرات خطا و تاثیر آن بر عملکرد سیستم، بدست آمده است. کنترل‌کننده فازی از نوع ممدانی و به روش کمینه و بیشینه طراحی شده است. در شکل (۶) نمودار سطح سه بعدی کنترل‌کننده فازی پیشنهادی نشان داده شده است. مقدار خطا نیز طبق رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

$$E = v_{DC}^* - v_{DC} \qquad (۵)$$



شکل (۴): دیاگرام بلوکی کنترل‌کننده پیشنهادی

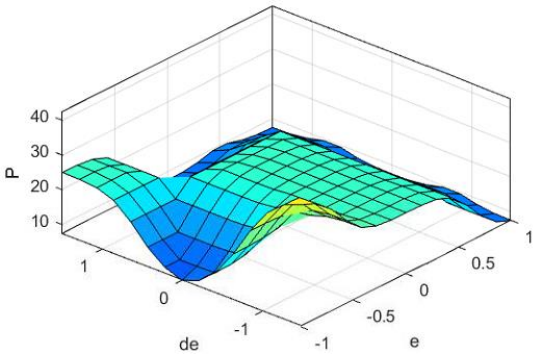


شکل (۵): توابع عضویت فازی، (الف)ورودی e، (ب) ورودی de، (ج) خروجی P، (د) خروجی I

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022

جدول (۱): قوانین کنترل‌کننده فازی پیشنهادی

Rule	E	De	P	I
1	N	P	M	M
2	N	Ze	S	S
3	N	N	H	S
4	Ze	N	M	S
5	Ze	Ze	M	M
6	Ze	P	S	H
7	P	N	S	H
8	P	Ze	S	M
9	P	P	S	H



شکل (۶): نمودار سطح سه بعدی کنترل‌کننده فازی پیشنهادی

۴- شبیه‌سازی

سیستم فتوولتاییک تک طبقه متصل به شبکه سه فاز در نرم افزار متلب مدلسازی شده است. عملکرد سیستم پیشنهادی تحت شرایط تابش متغیر مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تحلیل دینامیکی سیستم پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی شامل تحلیل توان pv (P_{PV})، ولتاژ لینک DC (V_{DC})، توان اکتیو شبکه (P_s)، دامنه ولتاژ شبکه (V_t)، جریان شبکه (I_s)، جریان بار (I_L)، جریان اینورتر (I_{SVC}) تحت شرایط تابش متغیر ارائه شده است. ماژول PV از نوع KC200GT است. پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده در جدول (۲) نشان داده شده است.

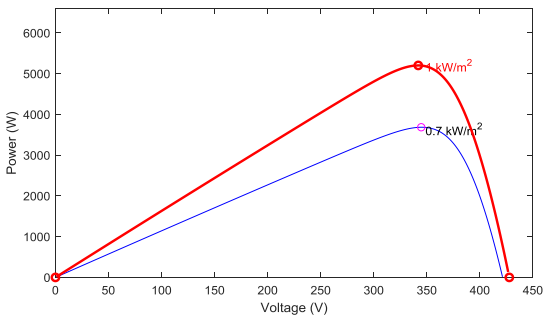
جدول (۲): پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده

پارامتر	مقدار	واحد
I_{sc}	۸,۲۱	آمپر
V_{oc}	۳۲,۹	ولت
P_{pv}	۵,۲	کیلو وات
T_s	۲	میکرو ثانیه
C_{DC}	۶۵۰۰	میکرو فاراد
L_f	۲,۵	میلی هانری
V_{sab}	۲۱۸	ولت
V_{DC}	۳۴۰	ولت
R_f	۵	اهم
C_f	۱۰	میکرو فاراد
R_L	۵۰	اهم
L	۱۰۰	میلی هانری

۴-۱- نتایج شبیه‌سازی

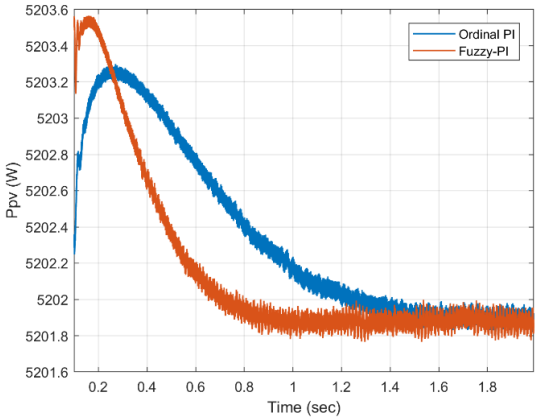
طبق نتایج در شبیه‌سازی فرض شده است که در ابتدا شدت تابش خورشید W/m^2 ۱۰۰۰ است. در ادامه در زمان ۲ ثانیه شدت تابش کاهش یافته و برابر W/m^2 ۷۰۰ می‌شود. منحنی توان-ولتاژ سیستم PV برای شدت تابش‌های ۱۰۰۰ و ۷۰۰ در شکل (۷) نشان داده شده است. توان تولیدی PV برای شدت تابش اول و دوم و برای روش کنترلی PI معمولی و Fuzzy PI در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده که بر اساس آن‌ها مشخص است که برای هر دو مقدار شدت تابش، روش Fuzzy PI با سرعت بسیار بیشتر و در مدت زمان بسیار کمتری به حالت ماندگار رسیده است. به نحوی که برای شدت تابش ۷۰۰ و بر اساس شکل (۹) مشخص است که مقدار توان تولیدی PV برای روش PI در زمان ۵ ثانیه به مقدار ماندگار رسیده در حالی که برای روشFuzzy PI توان PV در زمان ۳/۵ ثانیه به مقدار ماندگار رسیده است. علاوه بر این، برای روش PI نوسان توان PV بیشتر از روش Fuzzy PI است. این موضوع ناشی از سرعت بالای روش Fuzzy PI در ردیابی V_{DC}* است که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل مقدار V_{DC} برای هر دو روش کنترلی به همراه مقدار مرجع نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که در روش Fuzzy PI، مقدار V_{DC} به مدت ۲ ثانیه سریع‌تر از روش PI ، برابر با مقدار مرجع شده است که عملکرد بسیار بهتر آن در مقایسه با روش PI معمولی را اثبات می‌کند. در شکل (۱۱) توان اکتیو شبکه و در شکل (۱۲) نیز دامنه ولتاژ شبکه برای هر دو روش کنترلی نشان داده شده است. بر اساس شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که استفاده از روش Fuzzy PI موجب می‌شود که مقادیر ولتاژ و توان ۱/۵ ثانیه سریع‌تر از روش PI به مقدار ماندگار برسد و نوسان این متغیرها به‌صورت چشمگیری کاهش یافته است.

در شکل (۱۳) جریان شبکه، جریان بار و جریان اینورتر برای فاز A نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص است که جریان بار به‌شدت هارمونیکی ولی جریان شبکه کاملاً سینوسی است. در شکل های (۱۴) و (۱۵) نیز به‌ترتیب طیف هارمونیکی و مقدار اعوجاج هارمونیکی کل (THD) جریان بار و جریان شبکه برای فاز A نشان داده شده است. مشخص است که THD جریان بار بیشتر از ۳۰ درصد است در حالی‌که THD جریان شبکه حدود ۲ درصد شده است که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب کنترل‌کننده در جبران‌سازی هارمونیک‌های تولیدی بار است.

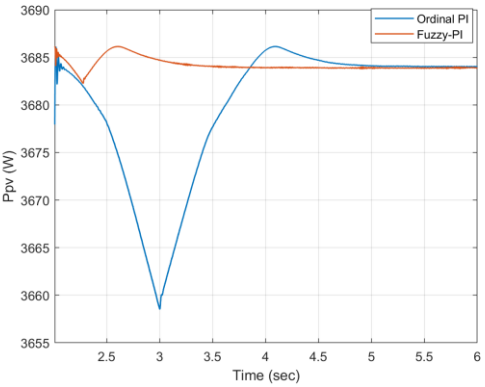


شکل (۷): منحنی توان-ولتاژ سیستم PV پیشنهادی

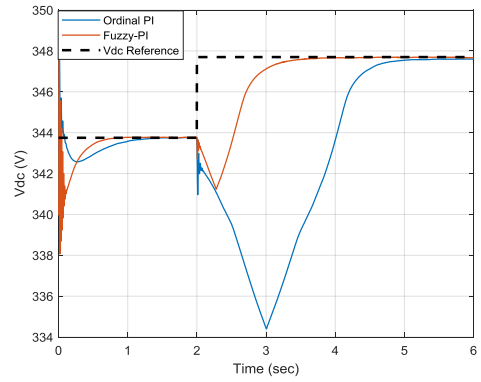
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



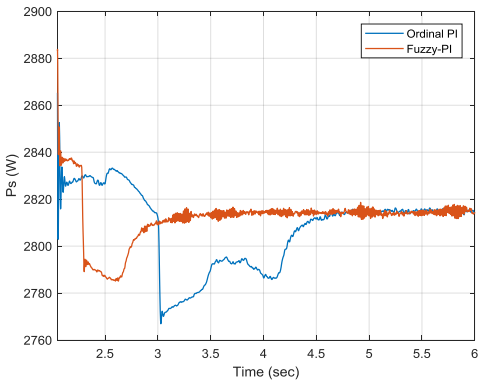
شکل (۸): توان تولیدی PV برای شدت تابش W/m^2 ۱۰۰۰ برای روش PI و Fuzzy PI



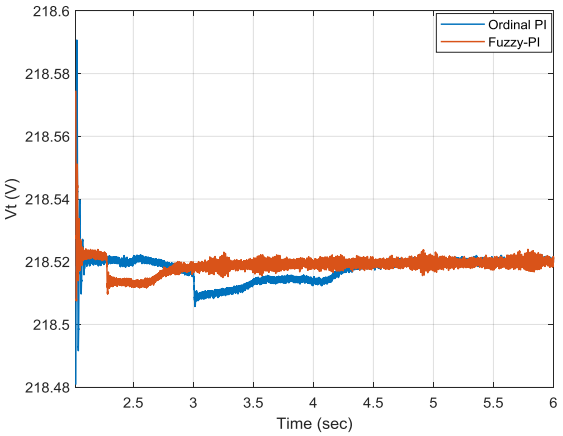
شکل (۹): توان تولیدی PV برای شدت تابش W/m^2 ۷۰۰ به روش‌های PI و Fuzzy PI



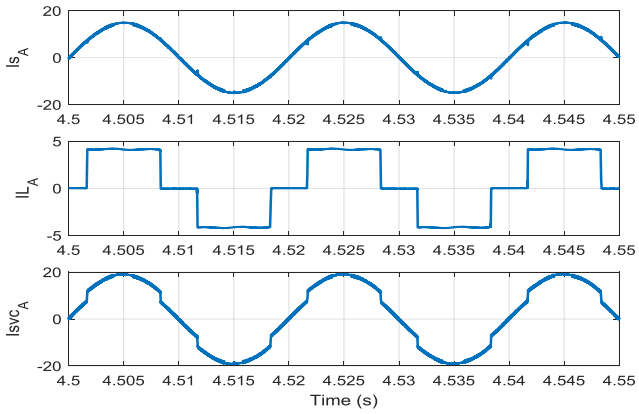
شکل (۱۰): ولتاژ Vdc به همراه مقدار مرجع آن برای روش PI و Fuzzy PI



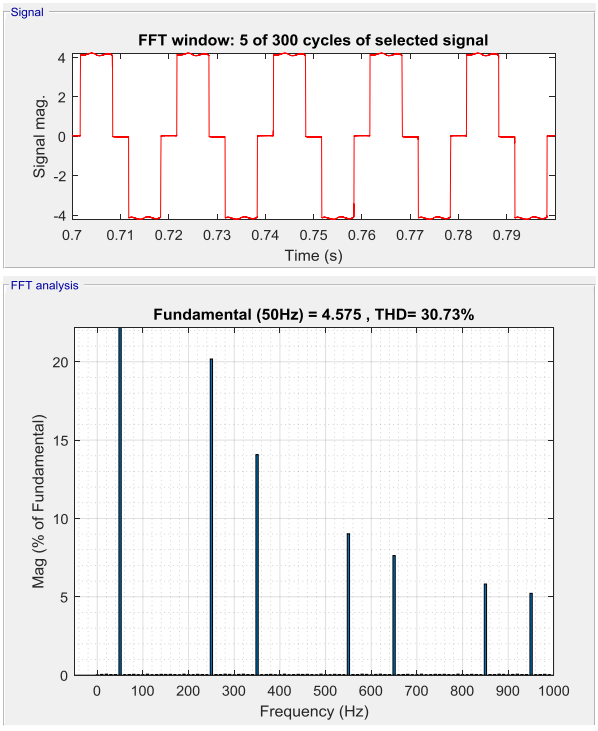
شکل (۱۱): توان اکتیو شبکه برای روش PI و Fuzzy PI



شکل (۱۲): دامنه ولتاژ شبکه برای روش PI و Fuzzy PI

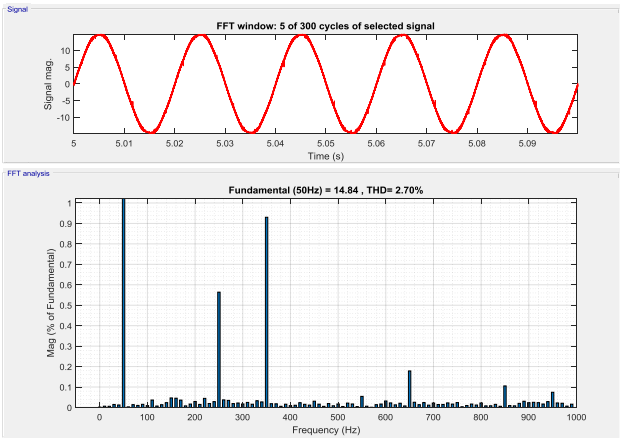


شکل(۱۳): جریان شبکه، جریان بار و جریان اینورتر برای فاز A



شکل (۱۴): مقدار THD جریان بار برای فاز A

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



شکل (۱۵): مقدار THD جریان شبکه برای فاز A

۴-۲- جداول مقایسه ای

همانطوری در بخش قبل شرح داده شد نتایج مقایسه شبیه‌سازی طبق روش پیشنهادی به مراتب بهتر از روش PI معمولی است که به منظور تحلیل دقیق‌تر، نتایج مقایسه کمی در جدول (۳) نشان داده شده است. مقایسه الگوریتم کنترلی پیشنهادی با ساختارهای مشابه نیز در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول(۳): مقایسه کمی الگوریتم کنترلی Fuzzy PI پیشنهادی با کنترل‌کننده PI معمولی

پارامتر	زمان نشست در روش PI(ثانیه)	زمان نشست در روش Fuzzy PI(ثانیه)	نوسان در روش PI	نوسان در روش FuzzyPI
P_{pv}	۵	۳/۵	زیاد	کم
Vdc	۵/۳	۳/۳	زیاد	کم
توان اکتیو شبکه(P_s)	۵	۳/۵	زیاد	کم
ولتاژ ترمینال(V_t)	۴/۵	۳	زیاد	کم

جدول(۴): مقایسه الگوریتم کنترلی پیشنهادی با ساختارهای مشابه

شماره	مرجع	روش کنترلی	ساختار سیستم	مزایا	معایب
۱	[7]	استفاده از فیلتر تطبیقی حداقل اختلاف مطلق لگاریتمی و الگوریتم آشوب و مشاهده	تک طبقه	توانایی استخراج جریان مرجع بدون اطلاع از مقادیر قبلی ولتاژ، افزایش قابلیت اعتماد، ایجاد ضریب توان واحد	استفاده از کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی منجر به محدودیت در پاسخ‌گویی شده
۲	[8]	الگوریتم ترکیبی ردیابی حداکثر توان	دو طبقه	استخراج حداکثر توان، بهبود کیفیت توان، تنظیم ولتاژ شبکه	افزایش تعداد المان‌ها و تلفات ناشی از آن
۳	[9]	فیلتر فعال ترکیبی مبتنی بر تولید جریان مرجع با فیلتر کالمن	دو طبقه	کمینه سازی افت ولتاژ، حذف هارمونیک‌های ناشی از بارهای غیر خطی	افزایش تعداد المان‌ها و تلفات ناشی از آن
۴	[10]	کنترل مبتنی بر حلقه کنترل جریان مود لغزشی و الگوریتم ردیابی حداکثر توان تطبیقی	دو طبقه	پاسخ‌گویی سریع به تغییرات و عدم حساسیت نسبت به عدم قطعیت پارامترهای سیستم	افزایش تعداد المان‌ها و تلفات ناشی از آن
۵	[11]	شبکه عصبی مبتنی بر رگرسیون حداقل مربعات گرادیان کاهشی	تک طبقه	حذف هارمونیک‌ها، بهبود کیفیت توان	عدم کارایی برای سیستم های سه فاز
۶	پیشنهادی	ترکیب الگوریتم مبتنی بر آشوب و مشاهده و کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی فازی	تک طبقه	پاسخ‌گویی سریع، افزایش سرعت ردیابی حداکثر توان، کاهش نوسانات پارامترهای ولتاژ و توان و بهبود کیفیت توان	

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

۵- نتیجه‌گیری

همانطوری که در بخش‌های قبلی بیان شد، اینورترها یکی از اجزای اصلی سیستم‌های فتوولتاییک هستند. کلیدزنی پیوسته اینورتر موجب ایجاد هارمونیک در ولتاژ و جریان خروجی خواهد شد. در روش‌های کنترلی موجود برای سیستم‌های فتوولتاییک تک طبقه، از کنترل‌کننده PI استفاده می‌شود. ضرایب این کنترل‌کننده به طور معمول برای یک نقطه کار خاصی از سیستم طراحی شده و با تغییر شرایط کاری، عملکرد آن افت می‌کند. همین موضوع سبب شده است که کنترل‌کننده دارای خطای ماندگار و همچنین قابلیت محدود در پاسخ‌گویی به تغی‌ی‌رات شدت تابش باشد. لذا برای رفع این مشکلات در این پژوهش، از روش کنترل فازی برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده PI استفاده شد. در روش کنترلی پیشنهادی، ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترل‌کننده PI بر اساس نقاط کار سیستم و از طریق کنترل‌کننده فازی به صورت لحظه ای تعیین گردید و این کار سبب شد که کنترل‌کننده در تمام شرایط کاری، عملکرد بهینه ای داشته باشد. در روش پیشنهادی، ضرایب کنترل‌کننده PI توسط سیستم فازی، به صورت برخط و بر اساس مقدار خطا و مشتق خطا محاسبه گردید. این روش سبب شد که ولتاژلینک DC به مدت ۲ ثانیه سریع‌تر از روش PI معمولی برابر با مقدار مرجع شده و دامنه ولتاژ شبکه به مدت ۱/۵ ثانیه سریع‌تر و توان اکتیو شبکه نیز ۲ ثانیه سریع‌تر به حالت ماندگار برسد و نوسان این متغیرها نیز به طرز چشمگیری کاهش یابد. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، موجب افزایش سرعت کنترل ولتاژ لینک DC، افزایش سرعت محقق شدن الگوریتم MPPT، کاهش نوسان ولتاژ لینک DC و همچنین کاهش نوسان توان خروجی اینورتر PV شده است. به منظور بهبود عملکرد کننده فازی پیشنهاد می‌گردد قوانین فازی مورد بررسی بیشتر قرار داده شود و در نتیجه به نظر می‌رسد بهینه‌سازی قوانین فازی منجر به حصول نتایج بهتر خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه کنترل‌کننده فازی نوع-۲ در برابر عدم قطعیت‌هایی که در قوانین فازی و یا پارامترهای سیستم بوجود می‌آید مقاوم است، لذا پیشنهاد می‌گردد که در کارهای آتی از کنترل‌کننده فازی نوع-۲ استفاده گردد.

مراجع

[1] A. Ashouri-Zadeh, M. Toulabi, A. S. Dobakhshari, S. Taghipour-Broujeni, and A. M. Ranjbar, "A novel technique to extract the maximum power of photovoltaic array in partial shading conditions," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* ,vol. 101, pp. 500-512, 2018.

[2] T.-F. Wu, C.-H. Chang, L.-C. Lin, and C.-L. Kuo, "Power loss comparison of single-and two-stage grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 2, pp. 707-715, 2011.

[3] R. B. Bollipo, S. Mikkili, and P. K. Bonthagorla, "Critical review on PV MPPT techniques: classical, intelligent and optimisation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 9, pp. 1433-1452, 2020.

[4] I. Yadav, S. K. Maurya, and G. K. Gupta, "A literature review on industrially accepted MPPT techniques for solar PV system," *International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708)*, vol. 10, no. 2, 2020.

[5] A. Moghassemi, S. Ebrahimi, and J. Olamaei, "Maximum power point tracking methods used in photovoltaic systems: A review," *Signal processing and renewable energy*, vol. 4, no. 3, pp. 19-39, 2020.

[6] A. Ouai, L. Mokrani, M. Machmoum, and A. Houari, "Control and energy management of a large scale grid-connected PV system for power quality improvement," *Solar Energy*, vol. 171, pp. 893-906, 2018.

[7] P. Shah, I. Hussain, and B. Singh, "Real-time implementation of optimal operation of single-stage grid interfaced PV system under weak grid conditions," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 7, pp. 1631-1643, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0623.

[8] B. Seghir, A. Chandra, and R. Miloud, "A new control strategy for power quality improvement using MPPT from hybrid PV-wind connected to the grid," in *2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE)*, 2018: IEEE, pp. 1-6 .

[9] P. K. Ray, S. R. Das, and A. Mohanty, "Fuzzy-controller-designed-PV-based custom power device for power quality enhancement," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp.۲۰۱۸ ,۴۰۵-۴۱۴ .

[10] O. P. Pahari and B. Subudhi, "Integral sliding mode-improved adaptive MPPT control scheme for suppressing grid current harmonics for PV system," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 16, pp. 1904-1914, 2018.

[11] N. Kumar, B. Singh, and B. K. Panigrahi, "Framework of gradient descent least squares regression-based NN structure for power quality improvement in PV-integrated low-voltage weak grid system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 12, pp. 9724-9733.۲۰۱۹ ,

رزومه



پریسا کلاه‌کج تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-الکترونیک از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر (۱۳۸۹) و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز در سال ۱۴۰۰ سپری

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022

نموده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه محاسبات نرم، کنترل هوشمند، منطق فازی، سامانه‌های خورشیدی و میکروکنترلرها است .



ابراهیم آقاجری تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق- ابزاردقیق از دانشگاه پونا هند (۱۳۸۷) و دکتری مهندسی برق-الکترونیک از همان دانشگاه در سال ۱۳۹۴ سپری نموده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه محاسبات نرم، بینایی ماشین، کنترل هوشمند، سیستم‌های فازی، سامانه‌های خورشیدی، پردازش تصویر و خانه‌های هوشمند است و در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز است.



سیدمحسن سیدموسوی تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه یزد (۱۳۷۶)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-سیستم‌های مخابراتی از دانشگاه تربیت مدرس تهران (۱۳۷۹) و دکتری مهندسی برق-کنترل از دانشگاه علوم تحقیقات واحد تهران در سال ۱۳۹۷ سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه تشخیص و جداسازی خطا، کنترل غیرخطی، کنترل بهینه در سیستم‌های قدرت است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Optimization of Inverter Control Algorithm of Single-Stage Photovoltaic System under Low Voltage Grid Conditions Using Fuzzy PI Controller

Parisa Kolah kaj[1], Ebrahim Aghajari[2*], Seyed Mohsen Seyed Mousavi[3]

1-Department of Electrical Engineering Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, Parisa-kolahkaj@iauahvaz.ac.ir
*2-Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, aghajari@iauahvaz.ac.ir
3-Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, m.moosavi@srbiau.ac.ir

Abstract: Nowadays, the use of renewable energy has become very important. Considering the changes in radiation intensity and the continuous switching of the inverter, the control algorithm of the inverter plays an important role. In the DC part, adjusting the voltage of the DC link is very important, and stabilizing the voltage at this point will have a significant impact on the performance of the entire system. In the existing methods in order to regulate the voltage, a proportional integral controller (PI) is used and the coefficients of this controller are usually fixed and its performance decreases when the working conditions change, so using structures with an approach Fuzzy is noticeable. The use of the fuzzy PI controller improves the performance of the controller, increases the speed of realizing the maximum power tracking algorithm, reduce the fluctuations of the DC link voltage and the output power of the photovoltaic system inverter. In this article, a new structure based on the fuzzy PI controller is presented in order to improve the performance of the inverter control algorithm, so that the DC link voltage becomes equal to the reference value for 2 seconds faster than the normal PI method and the grid voltage range for 1/5 seconds faster. And the active power of the grid will reach a steady state 2 seconds faster and the fluctuation of these variables will be significantly reduced.

Keywords: Optimization, photovoltaic system, fuzzy controller, PI controller

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.6.2]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022