

طراحی مشاهده گر نوین جریان خروجی UPS در سیستم کنترل پیش بین بر اساس مدل فضای حالت

محمدرضا علیزاده پهلوانی^۱، دانشیار؛ حمید ابراهیمی^۲، مربی؛ حامد حیدری دوست‌آباد^۳، همکار پژوهشی

۱- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - mr_alizadehp@mut.ac.ir

۲- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - h_ebrahimi@mut.ac.ir

۳- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - h_heydari@mut.ac.ir

چکیده: در این مقاله طراحی سیستم کنترل پیش بین بر اساس مدل فضا حالت جهت تولید پالس‌های کلیدزنی مناسب برای اینورتر سه فاز UPS مورد نظر است. دینامیک بسیار سریع و توانایی ارزیابی توابع هزینه مختلف از مزیت‌های کنترلر پیش بین طراحی شده می‌باشد. روابط موجود در سیستم کنترل حاکی از نیاز آن به مقدار جریان بار بوده که با توجه به نامشخص بودن بار، کاهش هزینه و بهبود قابلیت اطمینان، طراحی مشاهده گر جایگزین سنسور جریان شده است. مشاهده گرهای متداولی همچون لوئنبگر به لحاظ طراحی، پایداری و پیچیدگی با دشواری‌هایی همراه هستند. لذا در این مقاله مشاهده گر نوینی مبتنی بر تئوری سری فوری و تئوری توان لحظه‌ای طراحی شده که علاوه بر عملکرد مطلوب و برآورده سازی الزامات استاندارد، از جهت روابط حاکم بر آن شامل دینامیک و ثابت زمانی نبوده که پایداری و همگرایی آن را اثبات می‌کند. همچنین مشاهده گر پیشنهادی پارامتر خاص تنظیمی نداشته و فقط با اندازه گیری مقادیر ولتاژ خروجی و جریان فیلتر، توانایی مشاهده جریان بار را با دقت بسیار مناسبی دارد. مشاهده گر پیشنهادی این مقاله، توسط شبیه سازی UPS سه فاز ۲۲۰ ولت مورد آزمون قرار گرفته و نتایج حاصل با مشاهده گر متداول لوئنبگر مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: سیستم کنترل پیش بین، منبع تغذیه بدون وقفه، مشاهده گر جریان بار، اینورتر سه فاز، فیلتر LC.

Design a New Observer for Output Current of UPS in Predictive Control System base on State Space

M. R. Alizadeh Pahlavani¹, Associate Professor; H. Ebrahimi², Instructor; H. Heydari-doostabad³, Research Assistant

1- Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran,
E-mail: mr_alizadehp@mut.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran,
E-mail: h_ebrahimi@mut.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran,
E-mail: h_heydari@mut.ac.ir

Abstract: In this paper, the state space model predictive control system design for inverter switching pulses to produce the desired three-phase UPS outputs. Very fast dynamics and the ability to evaluate different cost functions of the advantages of predictive controller in designed. Relations in the system suggest a need to control the amount of time given the uncertain times, reduce costs and improve reliability, flow sensor, is designed to replace the observer. The common observers such as Luenberger Observer in terms of design, sustainability and complexity associated with difficulties. In this paper a novel observer based on fourier series and instanttius power theory in which desired operations have been achived, is designed. The proposed observer does not set specific parameters only measure of output voltage and filter current, ability to observation the load current with excellent accuracy. The proposed observer, a simulated 220-volt three-phase UPS tested and the results will be compared with Luenberger common observer.

Keywords: predictive control system, uninterruptible power supply, load current observer, three phase inverter, LC filter.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۳۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵

نام نویسنده مسئول: محمدرضا علیزاده پهلوانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - لویزان - خیابان شعبانلو - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک.

۱- مقدمه

کنترل اینورترهای فیلتردار در کاربردهایی که کیفیت توان بالا مورد نیاز است، بسیار اهمیت دارد. این گونه اینورترها در مواردی مانند منابع تغذیه بدون وقفه^۱ (UPS) مستقیماً از شبکه، تولیدات پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی و دیگر کاربردهای جدا از شبکه بر اساس انرژی‌های تجدیدپذیر و UPS استفاده می‌شوند [۱، ۲].

در مبدل UPS مطلوب تولید ولتاژ خروجی تنظیم شده با حداقل میزان هارمونیک می‌باشد، بنابراین بسیار حائز اهمیت است که خروجی UPS بدون در نظر گرفتن نوع بار اعم از خطی و غیرخطی، ولتاژی بدون ریبیل فراهم آید [۳].

اتصال فیلتر LC در خروجی اینورتر سه فاز، طراحی سیستم کنترل و تنظیم ولتاژ خروجی UPS را با دشواری‌هایی همراه می‌سازد. سیستم‌های کنترل متعددی برای این گونه UPS ها پیشنهاد شده‌اند که از جمله می‌توان به کنترل مُرده‌نوش^۲ [۴-۶]، کنترل فیدبک چندحلقه [۷]، کنترل تطبیقی بر اساس فیلترهای تشدید بانکی [۸]، کنترل‌های تکراری [۹، ۱۰] و استراتژی‌های تنظیم براساس کنترل H_{∞} [۱۱] اشاره کرد. در اکثر این کنترل‌کننده‌ها، از ولتاژ و جریان خروجی به صورت آشکارسازی در دو حلقه کنترل داخلی و خارجی با رویکردهای خطی و غیرخطی فیدبک گرفته می‌شود، این فیدبک برای تولید ولتاژهای مرجع جهت تولید پالس‌های آتش کلیدهای الکترونیک قدرت استفاده می‌شود.

کنترل پیش‌بین با توجه به پاسخ دینامیکی سریع آن راه حل بسیار خوبی در کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت می‌باشد [۱۲]. روش‌های پیش‌بینی جهت تولید پالس‌های آتش کلیدها در مرجع [۱۳] ارائه شده است. مرسوم‌ترین این روش‌ها را می‌توان روش مُرده‌نوش دانست که در مرجع [۱۴] برای کنترل جریان اینورتر، در مرجع [۱۵] برای کنترل ولتاژ خروجی یکسو ساز، در مرجع [۱۶] برای اینورتر سه فاز متصل به شبکه و در مرجع [۱۷] برای تنظیم ضریب توان استفاده شده است. پیاده‌سازی روش مُرده‌نوش در سیستم‌های گسسته با توجه به وابسته بودن سیستم کنترل به مقادیر اجزاء همراه با مقاوم نمودن کنترل‌کننده در مقابل نامعینی‌ها صورت می‌پذیرد. لذا روش‌های مختلفی بدین منظور ارائه شده است که در آن‌ها از سیستم‌های کنترل تطبیقی‌پذیر، شبکه‌های عصبی و دیگر سیستم‌های مقاوم با ساختارهای پیچیده استفاده شده است [۱۶، ۱۸ و ۱۹].

در روش پیش‌بین بر اساس مدل^۳ (MPC) که با نام کنترل افق پیش‌بین نیز شناخته می‌شود مدلی از سیستم، رفتار سیستم را در افق مشخصی از زمان پیش‌بینی کرده و با ارزیابی تابع هزینه بهترین عکس‌العمل برای آینده را انتخاب می‌نماید که تحقیق‌های متعددی در این زمینه در مبدل‌های قدرت صورت گرفته است و از آن جمله می‌توان به کاربردهای این روش در UPS ها اشاره نمود [۲۰-۲۵].

MPC روش کنترل منعطفی است که در کنترل‌کننده‌های سیستم‌های مقید و غیرخطی بسیار مناسب است. در MPC فرمولاسیون‌های مختلف از توابع هزینه با در نظر گرفتن متغیرهای گوناگون با انواع ضرایب وزنی و افق‌های پیش‌بینی متفاوت انجام می‌شود.

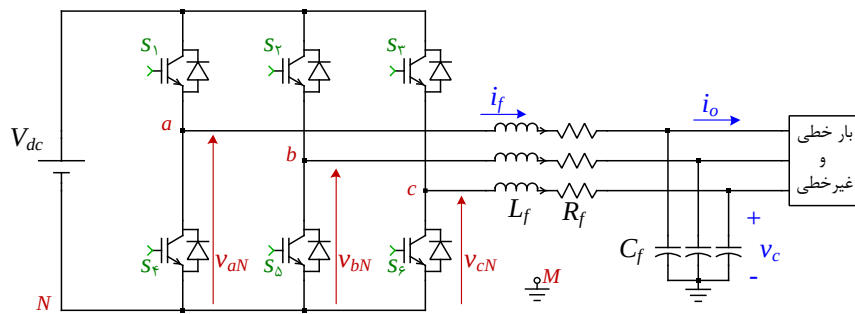
به منظور ساده‌سازی روش MPC، لازم است سیستم به صورت تعداد محدودی حالت کلیدزنی مدل شود و فقط یک گام برای افق در نظر گرفته شود. این امر ساده سازی معادلات و کاهش محاسبات را در پی خواهد داشت. کنترل پیش‌بین MPC با اندازه‌گیری ولتاژ خروجی و جریان فیلتر داخلی اینورتر، مدلی را برای گام بعدی پیش‌بینی نموده و با ارزیابی حالت‌های مختلف کلیدزنی در تابع هزینه، بهترین حالت کلیدزنی را به کلیدهای اینورتر اعمال می‌نماید.

این مقاله کنترل پیش‌بین MPC براساس مدل فضای حالت را جهت تولید پالس‌های آتش کلیدهای الکترونیک قدرت در اینورتر UPS سه فاز مجهز به فیلتر LC بررسی می‌نماید. همچنین به منظور کاهش تأثیر نویز در فیدبک‌گیری از جریان خروجی اینورتر و نیز کاهش تعداد سنسورها و بهبود قابلیت اطمینان سیستم، در این مقاله به جای استفاده از سنسور جریان خروجی از مشاهده گر جریان خروجی استفاده می‌شود. بدین منظور مشاهده گر نوینی براساس تئوری سری فوریه و تئوری توان لحظه‌ای ارائه می‌گردد و عملکرد مشاهده گر پیشنهادی با مشاهده گر لوئنبرگر^۴ مرجع [۲۶] مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. مشاهده گر پیشنهادی در این مقاله نسبت به مشاهده گرهای متداولی همچون لوئنبرگر، مشاهده گرهای دیگر عملکردی مشابه و در مواردی بسیار مطلوب‌تر داشته به طوری که در مورد بارهای غیرخطی خطای تخمین کمتری خواهیم داشت و این در حالی است که به لحاظ پیچیدگی محاسبات، مشاهده گر پیشنهادی نسبت به سیستم‌های مشابه جهت پیاده‌سازی عملی مناسب‌تر ارزیابی می‌شود.

ساختار مقاله شامل موارد زیر است. در قسمت دوم به بررسی و مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه که UPS شش کلید مجهز به فیلتر LC است پرداخته می‌شود. قسمت سوم مشاهده گر لوئنبرگر به صورت مختصر بررسی شده و روابط ریاضی مربوط به مشاهده گری نوین ارائه خواهد شد. قسمت چهارم سیستم کنترل پیش‌بین براساس مدل فضای حالت معرفی شده و نحوه عملکرد آن بیان می‌گردد. در قسمت پنجم به منظور بررسی صحت عملکرد سیستم پیشنهادی در این مقاله، شبیه‌سازی سیستم مورد نظر در محیط Matlab/Simulink ارائه خواهد شد و در قسمت پایانی نتیجه‌گیری استفاده از مشاهده گر پیشنهادی در این مقاله ارائه می‌گردد.

۲- مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه در این مقاله شامل تغذیه DC و اینورتر پل شش کلید، فیلتر LC و بار اعم از خطی و غیرخطی بوده که هر یک در این قسمت به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱: اینورتر موجود در سیستم UPS با فیلتر LC.

۲-۱- اینورتر تمام پل

این مدل به صورت دو معادله ارائه می شود که یکی مربوط به دینامیک اندوکتانس فیلتر و دیگری دینامیک موجود در رابطه خازن فیلتر است.

$$L_f \frac{d}{dt} i_f = V_i - V_c - R_f i_f \quad (5)$$

$$C_f \frac{d}{dt} v_c = i_f - i_o \quad (6)$$

که L_f و R_f اندوکتانس و مقاومت پارازیتی معادل سلف فیلتر و C_f ظرفیت خازنی فیلتر است.

با فرض متغیرهای حالت جریان سلف و ولتاژ خازن فیلتر، می توان معادلات حالت حاکم بر فیلتر LC را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_f \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_f}{L_f} & \frac{-1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} V_i + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{C_f} \end{bmatrix} i_o \quad (7)$$

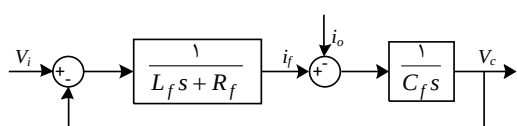
به منظور خلاصه سازی رابطه بالا، تغییر متغیرهایی به صورت زیر در نظر گرفته و این رابطه بازنویسی شده است:

$$x = \begin{bmatrix} i_f \\ v_c \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} \frac{-R_f}{L_f} & \frac{-1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix}; B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{C_f} \end{bmatrix}$$

$$\frac{dx}{dt} = Ax + BV_i + B_d i_o$$

در این روابط، i_f و v_c اندازه گیری شده، در حالی که V_i با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود، همچنین i_o به عنوان اغتشاش ناشناخته در نظر گرفته می شود. در این مقاله ولتاژ DC ثابت و مشخص بوده و خروجی UPS که ولتاژ v_c است به صورت زیر از متغیرهای حالت استخراج می شود:

$$v_c = [0 \quad 1]x \quad (10)$$



شکل ۲: مدل فاز فیلتر LC.

مدل زمان گسسته فیلتر را می توان از رابطه (۹) به صورت زیر استخراج کرد [۲۹]:

اینورتر موجود در UPS با فیلتر LC خروجی آن، در شکل ۱ نمایش داده شده است. مدل مبدل و فیلتر در این قسمت ارائه خواهد شد و با توجه به فرض نامعین بودن بار، به صورت یک بار غیر خطی یا خطی مدل شده است. بردار مرجع فضایی ولتاژ خروجی اینورتر (V_i) با استفاده از تبدیل کلارک بر اساس مرجع [۲۷] عبارت است از:

$$\vec{V}_i = V_d + jV_q = \frac{2}{3} V_{dc} (S_a + a S_b + a^2 S_c) \quad (1)$$

که a بردار یکه فضایی بوده و برابر با $e^{j\frac{2\pi}{3}}$ است و V_{dc} ولتاژ سمت DC اینورتر بوده که توسط باتری یا به وسیله یکسوساز از شبکه برق تأمین شود.

با در نظر گرفتن تمامی ترکیبات ممکن برای توابع کلیدزنی S_b ، S_c و S_a ، هشت حالت کلیدزنی و هشت بردار مرجع فضایی ولتاژ خروجی اینورتر حاصل می شود که با توجه به دو بردار صفر در این مقاله اینورتر به صورت یک سیستم غیر خطی با ۷ حالت مختلف کلیدزنی مدل شده (۸) است و هدف سیستم کنترل تعیین و انتخاب بهترین حالت کلیدزنی است.

۲-۲- فیلتر LC

بر اساس تئوری فضای برداری، در سیستم سه فاز متعادل بردار مختلط را می توان به صورت ترکیبی از سه فاز نوشت [۲۸]. بنابراین، بردار جریان سلف فیلتر i_f ، بردار ولتاژ خازن فیلتر v_c و بردار جریان بار i_o را می توان در فضای برداری به صورت زیر مدل کرد:

$$i_f = \frac{2}{3} (i_{fa} + a i_{fb} + a^2 i_{fc}) \quad (2)$$

$$v_c = \frac{2}{3} (v_{ca} + a v_{cb} + a^2 v_{cc}) \quad (3)$$

$$i_o = \frac{2}{3} (i_{oa} + a i_{ob} + a^2 i_{oc}) \quad (4)$$

که i_{fa} ، i_{fb} و i_{fc} به ترتیب جریان فاز a ، b و c سلف فیلتر، v_{ca} ، v_{cb} و v_{cc} به ترتیب ولتاژ فاز a ، b و c خازن فیلتر و i_{oa} ، i_{ob} و i_{oc} به ترتیب جریان فاز a ، b و c بار است.

بلوک دیگرام فیلتر LC مورد استفاده در UPS را می توان به صورت شکل ۲ بیان کرد.

مدل حلقه باز سیستم است که شامل یک ترم تصحیح بر اساس خروجی‌های اندازه‌گیری شده است. در حالت ماندگار چون $\hat{x} = x$ لذا ترم تصحیح $L(y - C\hat{x})$ بر مدل سیستم هیچ تأثیری نخواهد داشت و در صورتی که $\hat{x} = x$ نباشد دینامیک خطا به شرط هورویتز بودن ماتریس $A-LC$ پایدار و خطا $e = x - \hat{x}$ به صفر میل می‌کند. پس می‌توان دینامیک مربوط به مشاهده گر را بر اساس رابطه (۱۵) به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + BV_i + L(Cx - C\hat{x}) \quad (۱۷)$$

که در این رابطه L بهره مشاهده گر نام دارد. با ساده سازی رابطه (۱۷) خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_f \\ \hat{v}_c \\ \hat{i}_o \end{bmatrix} = A_{obs} \begin{bmatrix} \hat{i}_f \\ \hat{v}_c \\ \hat{i}_o \end{bmatrix} + B_{obs} \begin{bmatrix} V_i \\ v_c \end{bmatrix} \quad (۱۸)$$

که $A_{obs} = A-LC$ و $B_{obs} = [B \quad L]$ بوده و جریان خروجی UPS تخمین زده شده به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\hat{i}_o = [0 \quad 0 \quad 1]\hat{x} \quad (۱۹)$$

لازم به توضیح است که مشاهده گر به صورت فیلتری برای تخمین جریان بار (نامعین) $\hat{i}_o$ بر اساس جریان اندازه‌گیری شده سلف‌های فیلتر i_f ، ولتاژ اندازه‌گیری شده خازن‌های فیلتر v_c و ولتاژ خروجی اینورتر V_i عمل می‌نماید.

طراحی ماتریس L با مصالحه‌ای میان پهنای باند و حذف نویز^۵ انجام شود. یک روش مناسب جهت انتخاب بهره مشاهده گر، جابجایی قطب‌های مشاهده گر بیش از ده برابر دورتر از قطب‌های سیستم، در سمت چپ محور موهومی می‌باشد به صورتی است که دینامیک مشاهده گر سریع‌تر از دینامیک حلقه باز سیستم باشد.

۳-۲- مشاهده گر پیشنهادی

همان‌طور که اشاره شد، رابطه زیر ساده‌ترین روش برای تخمین جریان بار است:

$$i_o = i_f - C_f \frac{d}{dt} v_c \quad (۲۰)$$

با تغییر قاب مرجع خواهیم داشت:

$$\begin{pmatrix} i_{o\alpha} \\ i_{o\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{pmatrix} - C_f \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} v_{c\alpha} \\ v_{c\beta} \end{pmatrix} \quad (۲۱)$$

وجود مشتق از ولتاژ خروجی معایب این رابطه بوده، زیرا وجود مشتق به معنای پیش‌بینی ولتاژ خروجی است و حال آن‌که ولتاژ خروجی هدف سیستم کنترل پیش‌بین است. همچنین در صورت بروز اغتشاش و نویز در ولتاژ خروجی، استفاده از مشتق به معنای تقویت این اغتشاش خواهد بود [۲۹].

با وجود این سادگی، پیاده‌سازی این روش در کاربردهای عملی به دلیل مشتق‌گیری از ولتاژ با مشکل روبه‌رو می‌شود. پیاده‌سازی مشتق به وسیله پردازنده‌های دیجیتال، نیاز به محاسبه تفاضل ولتاژ طی یک زمان محدود دارد و برای پیاده‌سازی مناسب، این محاسبات باید حدود

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma V_i(k) + \Gamma_d i_o(k) \quad (۱۱)$$

که در این رابطه Φ ، Γ و Γ_d مؤلفه‌های گسسته مدل فیلتر بوده و به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\Phi = e^{AT_s} \quad (۱۲)$$

$$\Gamma = \int_0^{T_s} e^{A\tau} B d\tau$$

$$\Gamma_d = \int_0^{T_s} e^{A\tau} B_d d\tau$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای پیش‌بینی ولتاژ خازن‌های فیلتر و جریان سلف‌های فیلتر نیاز به جریان خروجی i_o است، ولی معمولاً این جریان اندازه‌گیری نشده و با توجه به نامعین بودن بار تخمین مناسبی از این جریان با استفاده از جریان اندازه‌گیری شده سلف‌های فیلتر و ولتاژ اندازه‌گیری شده خازن‌های فیلتر به صورت رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$i_o(k-1) = i_f(k-1) - \frac{C_f}{T_s} [v_c(k) - v_c(k-1)] \quad (۱۳)$$

با این حال این تخمین نسبت به نویز بسیار حساس بوده (زیرا بر اساس مشتق ولتاژ خازن‌های فیلتر است) و نیاز به یک مشاهده گر مناسب جهت تخمین جریان خروجی می‌باشد.

۳- مشاهده گر جریان خروجی UPS

۳-۱- مشاهده گر لوتنبرگر

جریان بار وابسته به بار متصل به خروجی بوده که نامعین است لذا بعضی فرضیات برای مشاهده آن نیاز است که این فرضیات مربوط به رفتار دینامیکی جریان بار است. فرض ساده‌ای که می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت آن است که تغییرات جریان بار نسبت به فرکانس نمونه‌برداری بسیار آهسته بوده در نتیجه می‌توان جریان بار را تقریباً ثابت در نظر گرفت، یا به عبارت دیگر:

$$\frac{di_o}{dt} = 0 \quad (۱۴)$$

با افزودن این رابطه به معادلات فضای حالت، می‌توان سیستم را به صورت زیر تغییر داد:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_f \\ v_c \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_f}{L_f} & \frac{-1}{L_f} & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & \frac{-1}{C_f} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ v_c \\ i_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (۱۵)$$

اگر خروجی سیستم جدید به صورت جریان سلف‌ها و ولتاژ خازن‌های فیلتر تعریف شود آنگاه داریم:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ v_c \\ i_o \end{bmatrix} \quad (۱۶)$$

مشاهده گر مرتبه کامل لوتنبرگر جهت مشاهده بردار حالات که با $\hat{x}$ نشان داده می‌شود استفاده می‌گردد [۲۹]. این مشاهده گر یک نوع

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} v_{ca} \approx \omega V_1 \cos(\omega t - \theta_1) \\ \frac{d}{dt} v_{cb} \approx \omega V_1 \sin(\omega t - \theta_1) \end{cases} \quad (24)$$

در نتیجه می توان مشاهده کرد که رابطه (۲۴) را با جایگزینی مؤلفه های قاب مرجع ساکن به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} v_{ca} \approx -\omega v_{cb} \\ \frac{d}{dt} v_{cb} \approx \omega v_{ca} \end{cases} \quad (25)$$

با استفاده از این جایگذاری، دامنه و فاز مؤلفه اصلی جمله مشتق حفظ شده در حالی که مؤلفه های هارمونیک توالی مثبت با ضریب $1/n$ و مؤلفه های هارمونیک توالی منفی با ضریب $1/n$ تضعیف می شوند. بنابراین این جایگذاری علاوه بر این که امکان پیاده سازی مشتق گیر ایده آل رابطه (۲۱) را فراهم می کند، به دلیل ذات فیلتر کردن موجود در این روش هارمونیک های ولتاژ نیز تقویت نمی شوند.

بنابر آن چه در مرجع [۳۰] ذکر شده است، با صرف نظر از بحث تقویت نویز های فرکانس بالا، چالش های موجود در فیلتر کردن و پیاده سازی فیلتر، لزوم نمونه برداری فرکانس بالا و وابستگی متغیرهای حالت، می توان از هارمونیک های مرتبه پایین صرف نظر کرد. همچنین با توجه به اعمال مشتق در رابطه (۱۹)، دامنه مربوط به هارمونیک ها با مقدار $1/n$ کاهش می یابد. بنابراین با فرض تولید ولتاژ خروجی مناسب و در حد استاندارد توسط اینورتر که حداکثر دامنه مجاز برای هر مؤلفه هارمونیک و طبق مرجع [۳۱] ۵٪ می باشد، حداکثر دامنه مشتق های ظاهر شده در رابطه (۲۳)، برابر با ۱٪ دامنه مؤلفه اصلی خواهد بود. بنابراین فرض تقریب در نظر گرفته شده در این مقاله با صرف نظر از حداکثر ۱٪ دامنه مؤلفه های هارمونیک می باشد.

در نهایت روش تخمین ولتاژ جریان با جایگذاری رابطه (۲۵) در (۲۱) به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \hat{i}_{o\alpha} = i_{f\alpha} + C_f \omega v_{cb} \\ \hat{i}_{o\beta} = i_{f\beta} - C_f \omega v_{ca} \end{cases} \quad (26)$$

همان طور که از رابطه (۲۶) مشهود است، رابطه تخمین جریان پیشنهادی یک رابطه جبری ساده است که فقط شامل تعداد محدودی اعمال ساده ریاضی از جمله جمع و ضرب می باشد. بنابراین مسائل مربوط به پایداری و شرایط و نرخ همگرایی برای روش پیشنهادی تعریف نمی شوند. روش پیشنهادی تنها از عدم قطعیت در پارامترهای فیلتر تأثیر می پذیرد و خطا در پارامترهای سیستم مانند اندوکتانس و مقاومت فیلتر سبب ایجاد خطا در ولتاژ تخمینی خواهد شد. بنابراین بررسی تأثیر عدم قطعیت ها و دقت مدل در عملکرد مشاهده گر لازم و ضروری می باشد. در روش پیشنهادی چون افت ولتاژ روی فیلتر خروجی در مقایسه با ولتاژ خروجی مبدل بسیار کوچک است، بنابراین خطا در پارامترهای فیلتر در یک محدوده وسیع نیز فقط سبب ایجاد خطای قابل صرف نظری در ولتاژ تخمینی خروجی می شود. بررسی تأثیر دقت مدل بر عملکرد روش پیشنهادی توسط آزمایش های

ده مرتبه در هر پریود کلیدزنی تکرار شود. همچنین خطای تخمین ولتاژ در این روش به لحظه کلیدزنی وابسته است، به طوری که خطای بزرگی در تخمین ولتاژ در لحظه های کلیدزنی ایجاد می شود، زیرا در لحظات کلیدزنی اغتشاش بزرگ و سریع در جریان به وجود می آید که سبب خطا در اندازه گیری و محاسبات بعدی خواهد شد. در نهایت مشکل بزرگ این روش تقویت نویزهای فرکانس بالای ولتاژ خط به دلیل عمل مشتق گیری می باشد.

در این قسمت به منظور تخمین جریان بار و کنار گذاشتن مشتق گیر بر سر راه ولتاژ خروجی، سیستم تخمین ساده ای پیشنهاد می شود که با وجود روابط بسیار ساده کارایی بسیار مناسبی داشته و از جهت پیاده سازی در سیستم های گسسته مطلوب می باشد.

همان طور که می دانیم بر اساس تئوری سری فوری، هر شکل موج متناوبی را می توان به صورت مجموعی از توابع مثلثاتی تعریف کرد. با این بحث می توان ولتاژ خروجی اینورتر را به صورت سینوسی و به شکل زیر بیان کرد:

$$\begin{cases} v_{ca} = \sum_{n=1,3,5,\dots} V_n \sin(n\omega t - \theta_n) \\ v_{cb} = \sum_{n=1,3,5,\dots} V_n \sin(n\omega t - \theta_n - 2n\pi/3) \\ v_{cc} = \sum_{n=1,3,5,\dots} V_n \sin(n\omega t - \theta_n + 2n\pi/3) \end{cases} \quad (27)$$

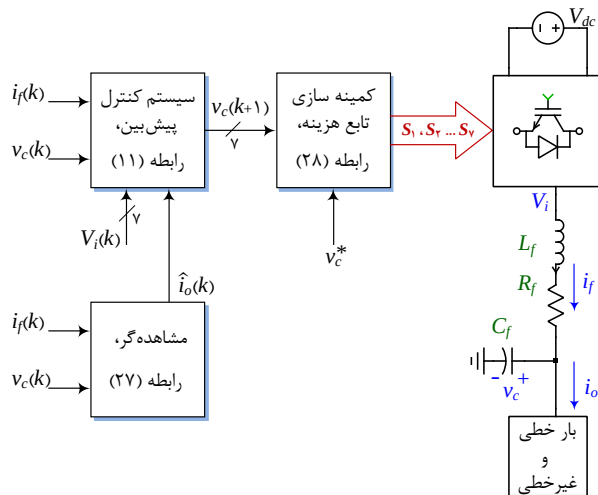
با اعمال تبدیل قاب مرجع ساکن به رابطه (۲۲)، مؤلفه های ولتاژ در قاب مرجع ساکن به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{cases} v_{ca} = \sum_{n=1,5,7,11,\dots} V_n \sin(n\omega t - \theta_n) \\ v_{cb} = - \sum_{n=1,7,13,\dots} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) + \sum_{n=5,11,17,\dots} V_n \cos(n\omega t - \theta_n) \end{cases} \quad (28)$$

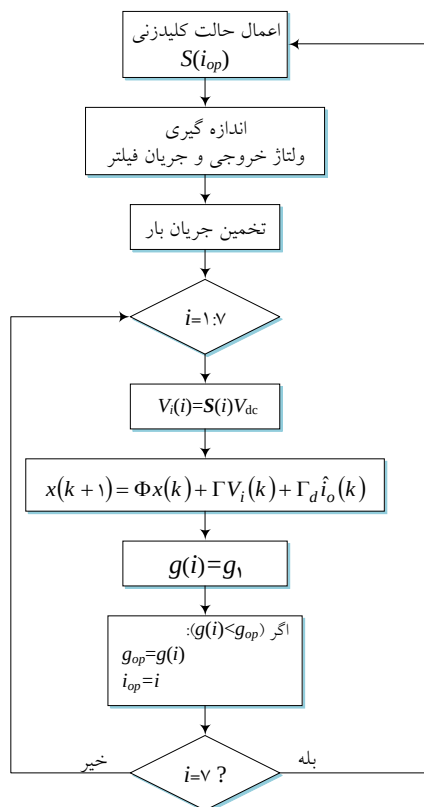
ذکر این نکته قابل توجه است که ولتاژ شبکه در سیستم های چهار سیمه می تواند شامل هارمونیک های مضرب سه باشد، اما در سیستم های سه سیمه که مورد مطالعه این تحقیق است، این هارمونیک ها وجود نخواهند داشت. هر چند همان طور که در رابطه (۲۳) مشاهده می شود، تبدیل قاب مرجع ساکن هارمونیک های مضرب سه را، حتی اگر وجود هم داشته باشند، حذف خواهد کرد. در نهایت با انجام عمل مشتق گیری بر روی رابطه (۲۳) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} v_{ca} = \sum_{n=1,5,7,11,\dots} n\omega V_n \cos(n\omega t - \theta_n) \\ \frac{d}{dt} v_{cb} = \sum_{n=1,7,13,\dots} n\omega V_n \sin(n\omega t - \theta_n) - \sum_{n=5,11,17,\dots} n\omega V_n \sin(n\omega t - \theta_n) \end{cases} \quad (29)$$

با فرض اینکه ولتاژ خروجی اینورتر به صورت سینوسی خالص بوده باشد، می توان در نظر داشت که در رابطه (۲۳) دامنه مؤلفه های هارمونیک صفر می باشد. لذا این رابطه را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:



شکل ۳: دیاگرام بلوکی سیستم کنترل پیشنهادی.



شکل ۴: فلوچارت سیستم کنترل پیشنهادی.

شکل ۳ دیاگرام بلوکی سیستم کنترل پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده v_c و جریان فیلتر اندازه‌گیری شده i_f با استفاده از رابطه (۲۶) پیشنهادی در این مقاله، مقدار جریان خروجی تخمین زده شده و برای سیستم کنترل پیش‌بین ارسال می‌شود. مقادیر اندازه‌گیری شده به همراه مقدار مشاهده گر جریان بار، با استفاده از رابطه (۱۱) مقدار ولتاژ خروجی برای تمامی حالات ممکن و برای گام نمونه‌برداری بعدی پیش‌بینی خواهد شد. با یافتن مقادیر پیش‌بینی شده ولتاژ خروجی، این مقادیر در توابع هزینه مورد نظر ارزیابی شده و از میان

شبیه‌سازی در قسمت‌های بعد به تفصیل بررسی شده که نتایج مطالب بالا را تأیید می‌کند.

۴- سیستم کنترل پیش‌بین پیشنهادی

به منظور کنترل مبدل ارائه شده در این مقاله استفاده از MPC پیشنهاد می‌شود. MPC مزایای فراوانی را به همراه داشته که برای کنترل این گونه سیستم‌ها بسیار مناسب است، از جمله: روند عملکرد بسیار آسان، قیود و غیرخطی بودن سیستم به سادگی قابل اجراست و رفتار مورد نظر سیستم را می‌توان به صورت تابع هزینه فرموله و کمینه کرد. این مقاله با پیش‌بینی رفتار اینورتر برای گام بعدی نمونه‌برداری در حالت‌های مختلف ممکن، با توجه به توابع هزینه مورد نظر، بهترین رفتار را برای آینده انتخاب و اعمال می‌کند. در شمایک سیستم کنترل از مدل حلقه باز سیستم برای پیش‌بینی و انتخاب بهترین حالت کلیدزنی استفاده شده است.

دیاگرام بلوکی سیستم کنترل پیشنهادی برای کاربرد UPS با اینورتر مجهز به فیلتر LC در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این شمایک، با اندازه‌گیری ولتاژ خروجی $v_c(k)$ و جریان فیلتر $i_f(k)$ ، با توجه به رابطه (۱۱) ولتاژ خروجی در گام بعدی نمونه‌برداری $v_c(k+1)$ می‌تواند پیش‌بینی شود. لازم به ذکر است که پیش‌بینی ولتاژ خروجی در رابطه (۱۱) نیاز به جریان بار $i_o(k)$ می‌باشد که در این مقاله با توجه به تأثیر نویز و اغتشاشات محیط بر جریان خروجی و این مطلب که اگر جریان خروجی علاوه بر جریان بار حاوی نویزهای محیطی نیز باشد ممکن است عملکرد سیستم کنترل را مختل کند، اقدام به تخمین جریان خروجی شده است. به عبارت دیگر استفاده از مشاهده گر به جای اندازه‌گیری جریان باعث می‌شود که در معادلات مربوط به پیش‌بینی ولتاژ خروجی، نویز و اغتشاشات محیطی که ناشی از عوامل متعددی مانند امواج مخابراتی است، مؤثر نباشد.

به منظور تخمین جریان بار در این مقاله ابتدا مشاهده گر لوئینر گر مورد بررسی قرار گرفت و سیستم مشاهده گر ساده‌ای مبتنی بر رابطه (۲۶) ارائه گردید که علاوه بر کارایی بسیار مناسب، از لحاظ دینامیکی و بحث پایداری به علت جبری بودن رابطه تخمین، بر کل سیستم تأثیری نامطلوبی نخواهد داشت. انتخاب بهترین حالت کلیدزنی و بهترین وضعیت کلیدها در گام نمونه‌برداری بعدی با توجه به مقادیر پیش‌بینی ولتاژ خروجی و ارزیابی تابع هزینه صورت خواهد گرفت.

در این مقاله با توجه به مطلوب سیستم UPS که داشتن ولتاژ سینوسی خالص بدون در نظر داشتن مقدار بار می‌باشد، تابع هزینه‌ای با نام g_1 به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$g_1 = (v_{ca}^* - v_{ca})^2 + (v_{cb}^* - v_{cb})^2 \quad (27)$$

که v_{ca}^* و v_{cb}^* قسمت‌های حقیقی و موهومی بردار ولتاژ مرجع خروجی بوده در حالی که v_{ca} و v_{cb} مقادیر حقیقی و موهومی ولتاژ خروجی پیش‌بینی شده $v_c(k+1)$ است.

شده، کمترین تابع هزینه را انتخاب کرده و معادل با آن بردار کلیدزنی مربوط به آن را به اینورتر اعمال می‌کند. در شکل ۶ (و) و شکل ۷ (و) خطای تخمین حاصل از تخمین گر پیشنهادی و تخمین گر لوئبرگر مشاهده می‌شود، در این شکل‌ها خطای تخمین سیستم پیشنهادی مقداری ثابت و با دامنه کمتر از ۲ آمپر می‌باشد و در مشاهده گر لوئبرگر این خطا متغیر بوده و در لحظات پیک جریان به حدود رسیده است. در شکل ۶ (هـ) و شکل ۷ (هـ) جریان تخمین زده شده و مرجع در قاب مرجع $\alpha\beta$ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۶ (الف، ب) و شکل ۷ (الف، ب) ولتاژ پیش‌بینی شده اینورتر، ولتاژ خروجی اینورتر مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی بسیار نزدیک به هم بوده که بیان گر دقت بالای سیستم است. طیف هارمونیک موجود در شکل‌های (ج) نیز بیان گر تولید ولتاژ با THD مناسب و در حد استاندارد می‌باشد. به‌طور مشابه در شکل‌های ۸ و ۹ نیز عملکرد سیستم کنترل به همراه تخمین جریان بار مشاهده می‌شود که عملکرد مناسب سیستم پیشنهادی را در مقابله با تغییر بار از بی‌باری تا بار کامل اثبات می‌کند. همان‌طور که در این دو شکل مشاهده می‌شود، تخمین جریان بار در مشاهده گر پیشنهادی در مقایسه با مشاهده گر لوئبرگر خطای بیشتری داشته ولی به لحاظ پیچیدگی محاسبات و پیاده‌سازی بسیار مناسب‌تر است. به‌منظور ارزیابی تخمین گر پیشنهادی در مواجهه با بار غیرخطی، همان‌طور که در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، خطای تخمین جریان بار نسبت به مشاهده گر لوئبرگر بسیار مناسب‌تر بوده که نتیجه آن اعوجاج کمتر در ولتاژ خروجی اینورتر شده است.

رفتار گذرای سیستم کنترل پیشنهادی برای یکبار پله‌ای از بی‌باری تا بار کامل با استفاده از مشاهده گر لوئبرگر در شکل ۸ و با استفاده از مشاهده گر پیشنهادی در شکل ۹ نشان داده شده که بار مقاومتی 20Ω در لحظه $0.085s$ متصل شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ولتاژ خروجی متأثر از تغییر بار نبوده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد مطلوب سیستم کنترل با استفاده از مشاهده گر لوئبرگر و مشاهده گر پیشنهادی در مورد بار خطی با اندکی تفاوت مشابه است. به‌عنوان آزمایشی دیگر، رفتار مبدل در مواجهه با بارهای غیرخطی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

با استفاده از پل یکسوساز دیودی نشان داده شده در شکل ۵ به‌عنوان بار غیرخطی سه‌فاز، عملکرد مبدل با استفاده از مشاهده گر لوئبرگر در شکل ۱۰ و با استفاده از مشاهده گر پیشنهادی در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مشاهده گر لوئبرگر در مواجهه با بار غیرخطی نسبت به سیستم پیشنهادی در این مقاله عملکرد ضعیف‌تری داشته به‌طوری که تخمین در روش پیشنهادی با دقت بسیار بیش‌تری نسبت به روش لوئبرگر انجام می‌گیرد. این در حالی است که سیستم مشاهده گر لوئبرگر به لحاظ محاسبات ریاضی از مشاهده گر پیشنهادی در این مقاله با پیچیدگی بسیار بالاتری همراه است.

تمام حالات موجود، حالت کلیدزنی که کمترین تابع هزینه را ایجاد می‌کند به اینورتر اعمال می‌شود. فلوچارت سیستم کنترل پیشنهادی در شکل ۴ ارائه شده است.

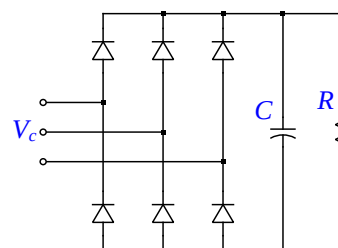
۵- نتایج شبیه‌سازی

سیستم کنترل پیشنهادی در این مقاله بر روی اینورتر مجهز به فیلتر LC آزمایش شده و نتایج حاصل از آزمایش در این قسمت ارائه می‌شود. پارامترهای سیستم مورد آزمون در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: پارامترهای سیستم مورد آزمایش.

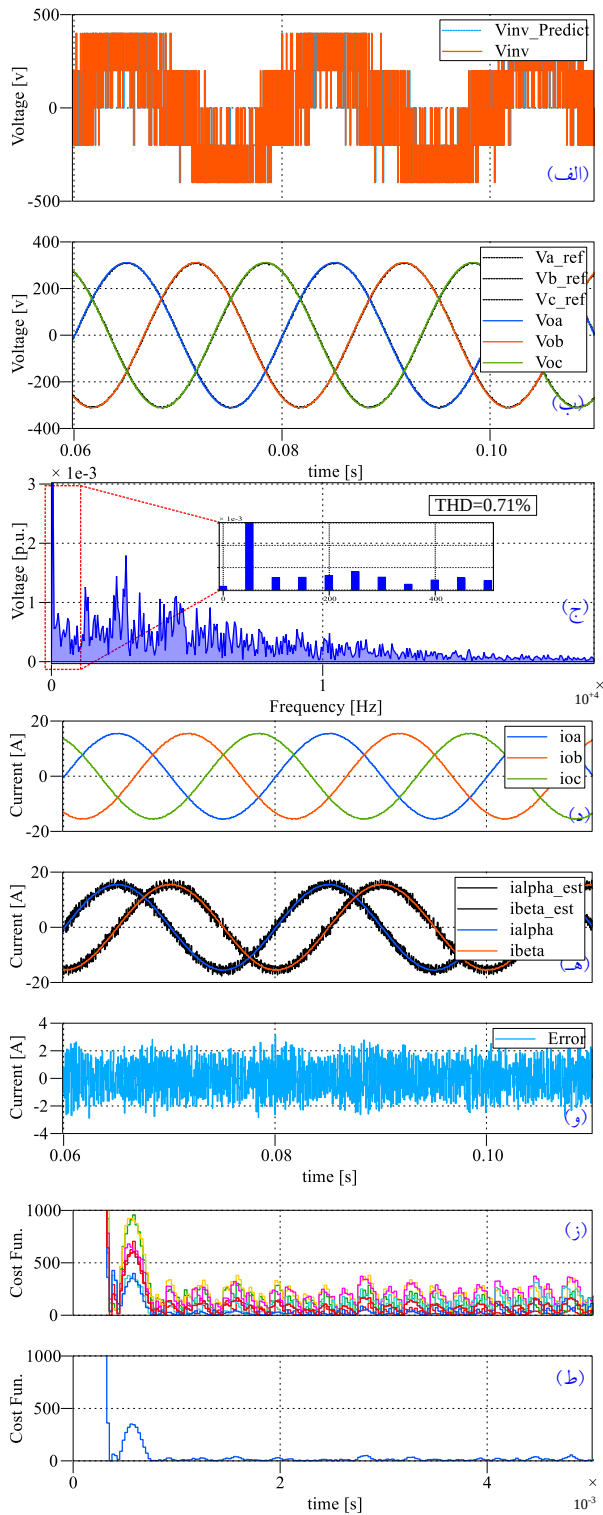
پارامتر	مقدار
ولتاژ لینک DC (V_{dc})	$600 [V]$
اندوکتانس فیلتر (L_f)	$2/4 [mH]$
مقاومت فیلتر (R_f)	$0/1 [\Omega]$
خازن فیلتر (C_f)	$20 [\mu F]$
خازن لینک DC ($C_{dc-link}$)	$1000 [\mu F]$
زمان نمونه‌برداری ($T_{sampling}$)	$20 [\mu s]$
مقاومت بار خطی (R)	$20 [\Omega]$
بار غیرخطی سه‌فاز	خازن بار (C)
	مقاومت بار (R)
	$60 [\Omega]$

پیاده‌سازی الگوریتم کنترل پیش‌بین مشتمل بر مشاهده گر جریان بار پیشنهادی در این مقاله با حداقل زمان نمونه‌برداری $T_s=20\mu s$ قابل حصول است. همچنین آزمایش‌های مورد نظر در حضور بار خطی و غیرخطی همانند شکل ۵ انجام گرفته است.

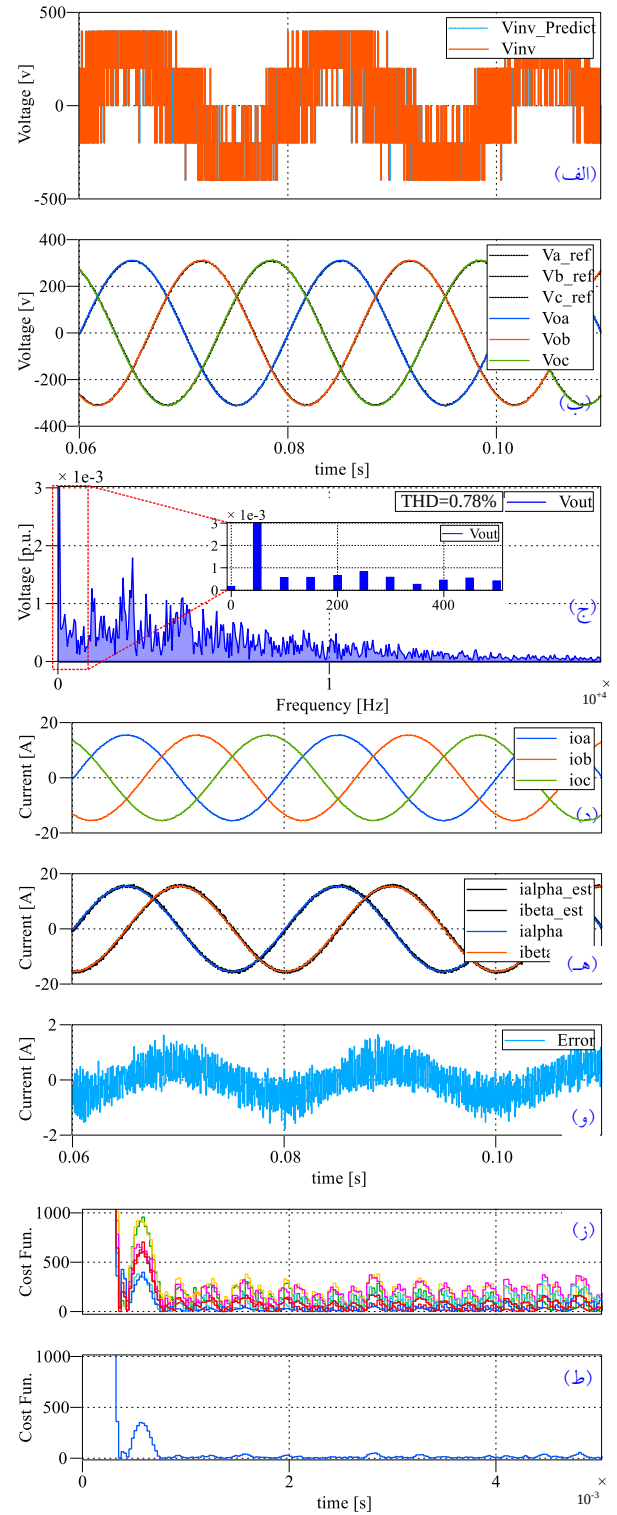


شکل ۵: یکسوساز پل دیودی استفاده شده به‌عنوان بار غیرخطی.

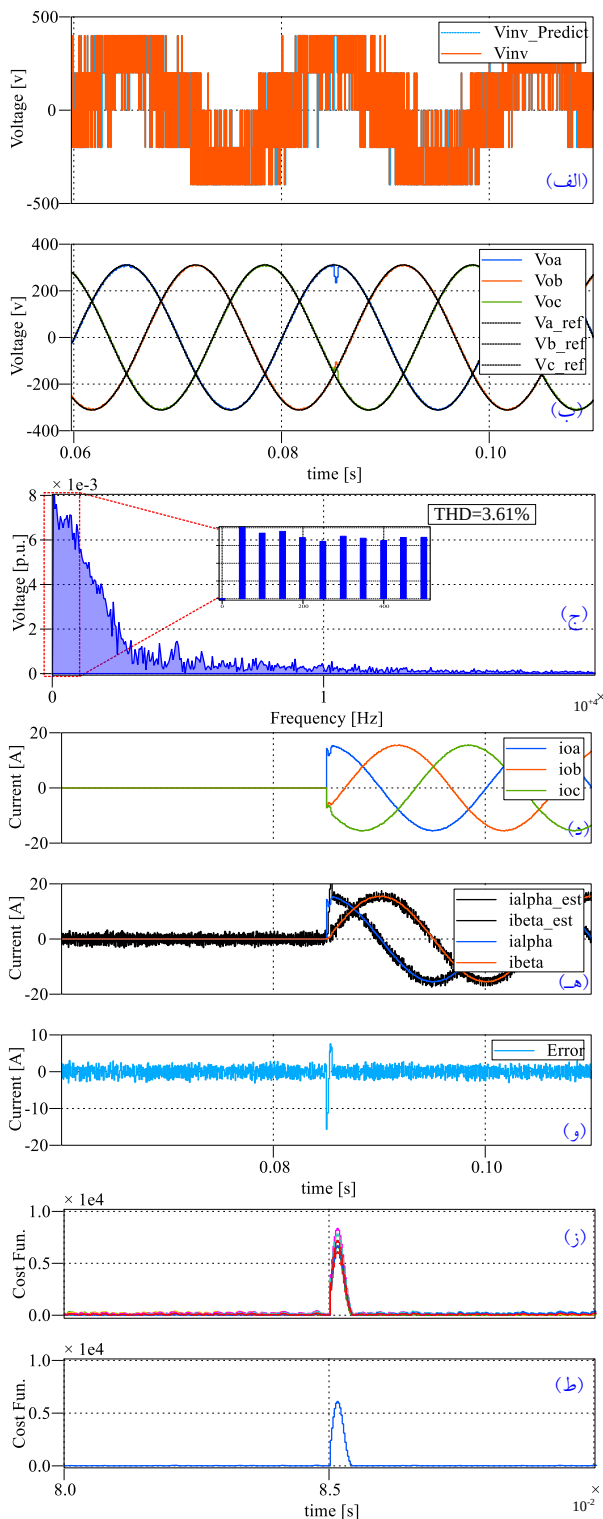
رفتار سیستم پیشنهادی در عملکرد حالت دائم برای بار مقاومتی 20Ω با استفاده از مشاهده گر لوئبرگر در شکل ۶ و با استفاده از مشاهده گر پیشنهادی در شکل ۷ نشان داده شده است. دامنه ولتاژ مرجع برابر با $220V$ و فرکانس $50Hz$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، ولتاژ خروجی و جریان بار سینوسی و با اغتشاش بسیار اندک است. با توجه به مقاومتی بودن بار، جریان بار متناسب با ولتاژ خروجی است در حالی که جریان اندازه‌گیری شده فیلتر خروجی مبدل هارمونیک‌های فرکانس بالایی را نشان می‌دهد که به وسیله فیلتر تقلیل شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۶ (ز و ط) و شکل ۷ (ز و ط) مشاهده می‌شود، سیستم کنترل پیش‌بین با ارزیابی ۷ تابع هزینه تولید شده توسط ۷ بردار ولتاژ خروجی پیش‌بین



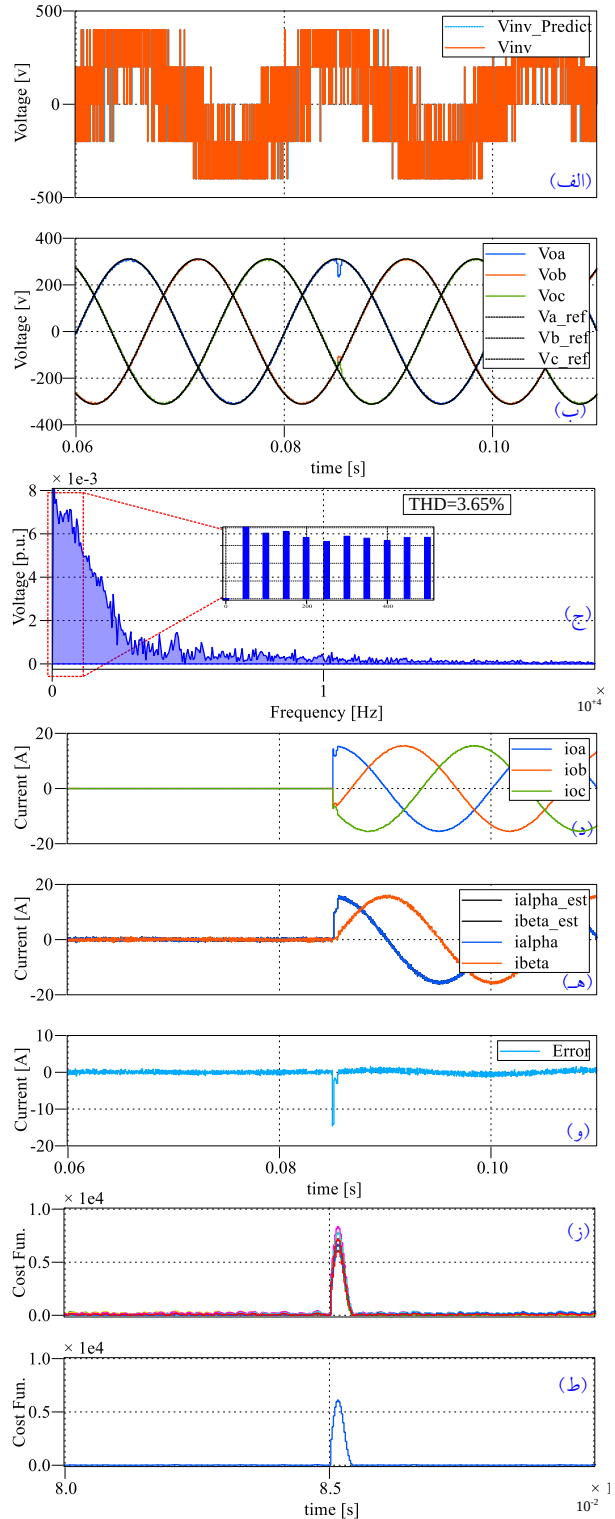
شکل ۷: نتایج شبیه سازی بار مقاومتی خالص با استفاده از مشاهده گر پیشنهادی (الف). ولتاژ اینورتر، ب. ولتاژ سه فاز خروجی، ج. طیف هارمونیک ولتاژ خروجی، د. جریان سه فاز بار، ه. ولتاژ تخمینی، و. خطای تخمین جریان خروجی، ز. مقادیر توابع هزینه، ط. تابع کمینه).



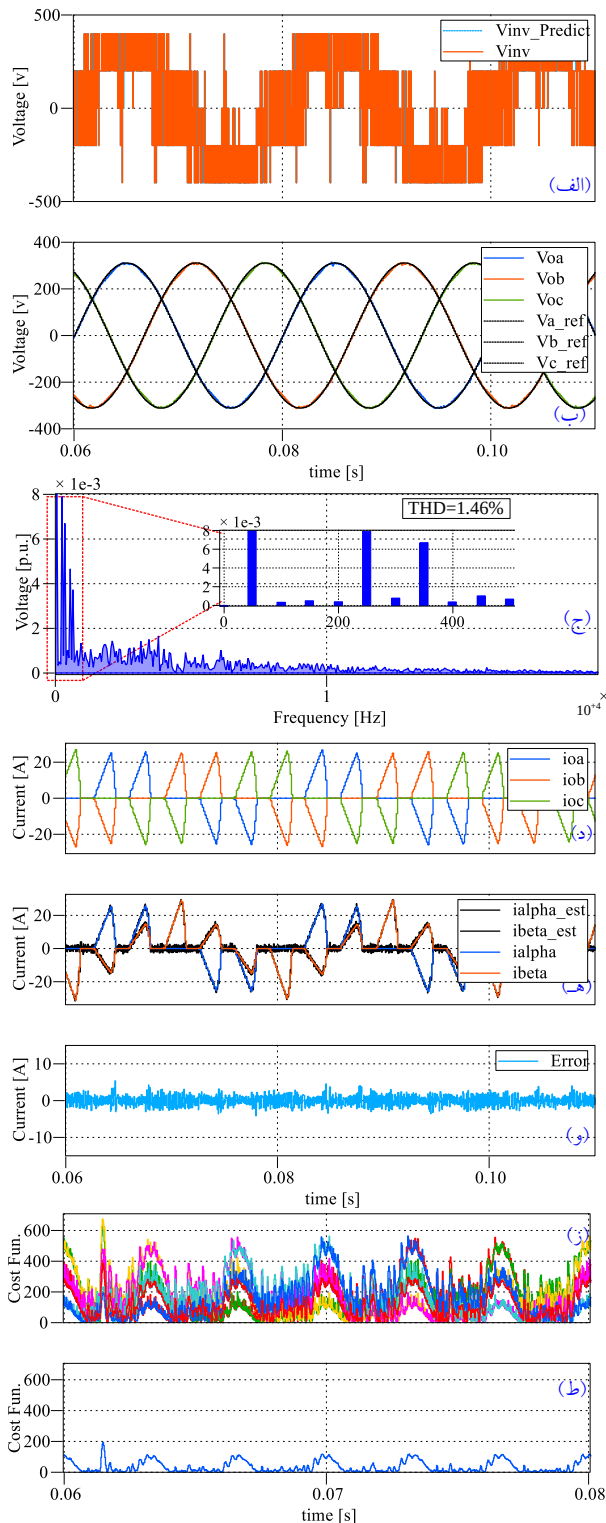
شکل ۸: نتایج شبیه سازی بار مقاومتی خالص با استفاده از مشاهده گر لوتنبرگر (الف). ولتاژ اینورتر، ب. ولتاژ سه فاز خروجی، ج. طیف هارمونیک ولتاژ خروجی، د. جریان سه فاز بار، ه. ولتاژ تخمینی، و. خطای تخمین جریان خروجی، ز. مقادیر توابع هزینه، ط. تابع کمینه).



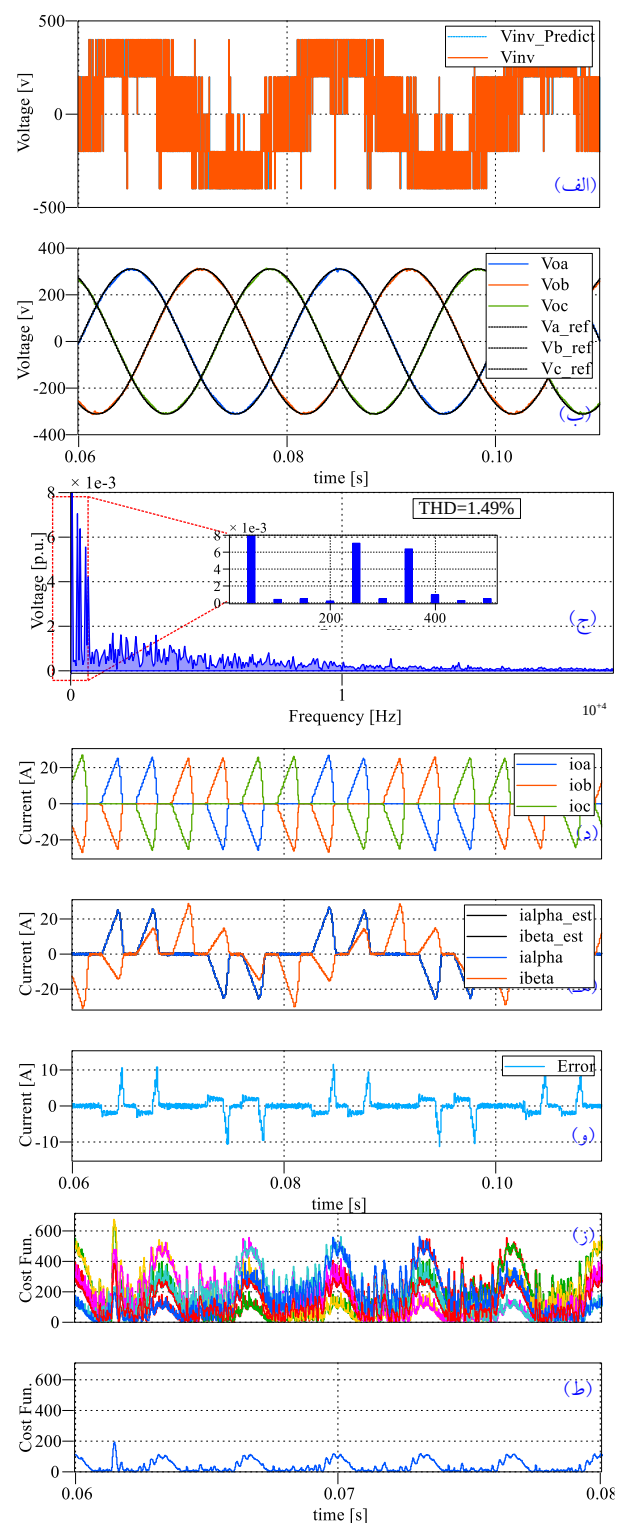
شکل ۹: نتایج شبیه سازی بی باری تا بار کامل با استفاده از مشاهده گر پیشنهادی (الف). ولتاژ اینورتر، ب. ولتاژ سه فاز خروجی، ج. طیف هارمونیک ولتاژ خروجی، د. جریان سه فاز بار، ه. ولتاژ تخمینی، و. خطای تخمین جریان خروجی، ز. مقادیر توابع هزینه، ط. تابع کمینه).



شکل ۸: نتایج شبیه سازی بی باری تا بار کامل با استفاده از مشاهده گر لونیبرگر (الف). ولتاژ اینورتر، ب. ولتاژ سه فاز خروجی، ج. طیف هارمونیک ولتاژ خروجی، د. جریان سه فاز بار، ه. ولتاژ تخمینی، و. خطای تخمین جریان خروجی، ز. مقادیر توابع هزینه، ط. تابع کمینه).



شکل ۱۱. نتایج شبیه سازی بار غیرخطی با استفاده از مشاهده گر لوتنبرگر (الف). ولتاژ اینورتر، ب. ولتاژ سه فاز خروجی، ج. طیف هارمونیک ولتاژ خروجی، د. جریان سه فاز بار، ه. ولتاژ تخمینی، و. خطای تخمین جریان خروجی، ز. مقادیر توابع هزینه، ط. تابع کمینه).



شکل ۱۰. نتایج شبیه سازی بار غیرخطی با استفاده از مشاهده گر لوتنبرگر (الف). ولتاژ اینورتر، ب. ولتاژ سه فاز خروجی، ج. طیف هارمونیک ولتاژ خروجی، د. جریان سه فاز بار، ه. ولتاژ تخمینی، و. خطای تخمین جریان خروجی، ز. مقادیر توابع هزینه، ط. تابع کمینه).

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به تحلیل و آزمایش سیستم کنترل پیش بین بر اساس مدل فضای حالت در کاربرد UPS پرداخته شد. UPS مورد آزمون شامل اینورتری سه فاز و فیلتر LC بوده که از طریق لینک DC ثابت ۶۰۰ ولت تغذیه شده و ولتاژی ۲۲۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز را برای بارهای خطی و غیرخطی تولید خواهد کرد. با توجه به دینامیک سریع کنترل پیش بین، از این روش جهت کلیدزنی اینورتر استفاده شد. روابط موجود در سیستم کنترل پیش بین نشان دهنده نیاز عملکرد سیستم به تعیین مقدار جریان بار است. با توجه نامشخص بودن و در عین حال تابع شرایط فیزیکی محیط بودن جریان بار، استفاده از مشاهده گر به جای سنسور پیشنهاد می شود که علاوه بر تأمین قابلیت اطمینان بالاتر، بحث حذف نویز را نیز در بر خواهد داشت. لذا در این مقاله ابتدا مشاهده گر متداول لوتنبرگر مورد بررسی قرار گرفت و سپس مشاهده گر نوینی مبتنی بر عملیات جبری پیشنهاد شد که علاوه بر عملکرد مطلوب، به دلیل دینامیکی نبودن معادلات مشاهده گر پیشنهادی، از لحاظ سرعت عملکرد، پایداری و پیاده سازی عملیاتی نسبت به مشاهده گرهای متداول در مرتبه بالاتری قرار خواهد گرفت. مشاهده گر پیشنهادی برخلاف سایر سیستم های مشابه، نیاز به تنظیم پارامتر خاصی نداشته و به لحاظ طراحی تنظیم کننده و مقاوم بودن، بسیار مناسب می باشد.

به منظور بررسی صحت عملکرد سیستم پیشنهادی در این مقاله شبیه سازی در محیط Matlab/Simulink انتخاب گردید و نتایج حاصل نشان داد که مشاهده گر پیشنهادی در شرایط مختلف اعم از بار خطی، تغییرات بار خطی از بی باری تا بار کامل و بارهای غیرخطی عملکرد بسیار مطلوبی از خود بروز می دهد به طوری که در مورد بارهای غیرخطی سه فاز، مشاهده گر پیشنهادی نسبت به مشاهده گر متداول لوتنبرگر نیز از دقت بالاتری در مشاهده جریان خروجی برخوردار است. با توجه به نیاز سیستم کنترل پیش بین به مقدار دقیق جریان بار، این دقت بیش تر در مشاهده گر پیشنهادی، علاوه بر تضمین صحت عملکرد سیستم، کاهش اعوجاج کلی ولتاژ UPS را نیز در بر خواهد داشت.

مراجع

- [5] O. Kukrer, "Deadbeat Control of a Three-Phase Inverter with an Output LC Filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 11, no. 1, pp. 16–23, 1996.
- [6] M. Kojima, K. Hirabayashi, Y. Kawabata, E. C. Ejiogu and T. Kawabata, "Novel Vector Control System Using Deadbeat-Controlled PWM Inverter with Output LC Filter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 1, pp. 162–169, 2004.
- [7] P. C. Loh and D. G. Holmes, "Analysis of Multiloop Control Strategies for LC/CL/LCL-Filtered Voltage-Source and Current-Source Inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 2, pp. 644–654, 2005.
- [8] A. Kulka, T. Undeland, S. Vazquez and L. G. Franquelo, "Stationary Frame Voltage Harmonic Controller for Standalone Power Generation," in *Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, 2007, pp. 1–10.
- [9] G. Escobar, P. Mattavelli, A. M. Stanković, A. A. Valdez and J. Leyva-Ramos, "An Adaptive Control for UPS to Compensate Unbalance and Harmonic Distortion Using a Combined Capacitor/Load Current Sensing," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 839–847, 2007.
- [10] G. Escobar, A. A. Valdez, J. Leyva-Ramos and P. Mattavelli, "Repetitive-Based Controller for a UPS Inverter to Compensate Unbalance and Harmonic Distortion," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 504–510, 2007.
- [11] G. Willmann, D. F. Coutinho, L. F. A. Pereira and F. B. Libano, "Multiple-Loop H-Infinity Control Design for Uninterruptible Power Supplies," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 3, pp. 1591–1602, 2007.
- [12] P. Cortés, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo and J. Rodríguez, "Predictive Control in Power Electronics and Drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4312–4324, 2008.
- [13] R. Kennel and A. Linder, "Predictive Control of Inverter Supplied Electrical Drives," in *2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2000, vol. 00, no. c, pp. 761–766.
- [14] S. M. Yang and C. H. Lee, "A Deadbeat Current Controller for Field Oriented Induction Motor Drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 5, pp. 772–778, 2002.
- [15] L. Hang, S. Liu, G. Yan, B. Qu and Z. LU, "An Improved Deadbeat Scheme with Fuzzy Controller for the Grid-side Three-Phase PWM Boost Rectifier," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1184–1191, 2011.
- [16] J. He, Y. W. Li, X. Liang, D. Xu, B. Liang and C. Wang, "Deadbeat Weighted Average Current Control with Corrective Feed-forward Compensation for Microgrid Converters with Non-Standard LCL Filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2016.
- [17] P. Mattavelli, G. Spiazzi and P. Tenti, "Predictive Digital Control of Power Factor Preregulators With Input Voltage Estimation Using Disturbance Observers," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 1, pp. 140–147, 2005.
- [18] Y. Weike and L. B. X. Yong, "Fuzzy Neural Networks and GA Based Predictive Control for Active Power Filter," *2013 Fifth Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom.*, pp. 598–601, Jan. 2013.
- [19] J. A. Rothen, J. R. Espinoza, J. A. Munoz, M. A. Perez, P. E. Melin, J. J. Silva, E. E. Espinosa and M. E. Rivera, "Model Predictive Control for Power Converters in a Distorted Three-Phase Power Supply," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 9, pp. 5838–5848, Sep. 2016.
- [20] Y. Tao, Q. Wu, L. Wang and W. Tang, "Voltage Sensorless Predictive Direct Power Control of Three-Phase PWM Converters," *IET Power Electron.*, vol. 9, no. 5, pp. 1009–1018, Apr. 2016.

- [1] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galván, R. C. P. Guisado, M. Á. M. Prats, J. I. León and N. Moreno-Alfonso, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006.
- [2] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, 2006.
- [3] M. Aamir, K. A. Kalwar and S. Mekhilef, "Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) System," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1395–1410, May 2016.
- [4] P. Mattavelli, "An improved deadbeat control for UPS using disturbance observers," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 1, pp. 206–212, 2005.

- [26] P. Cortés, G. Ortiz, J. I. Yuz, J. Rodríguez, S. Vazquez and L. G. Franquelo, "Model Predictive Control of an Inverter with Output LC Filter for UPS Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 1875–1883, 2009.
- [27] J. Rodríguez and P. Cortes, *Predictive control of power converters and electrical drives*. Wiley-IEEE Press, 2012.
- [28] R. L. Doeuff and M. E. H. Zaïm, *Rotating Electrical Machines*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2010, p. 7.
- [29] K. M. Moudgalya, *Digital Control*. John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 21–24.
- [30] H. Gholami-Khesht, S. Golestan and M. Monfared, "Low computational burden grid voltage estimation for grid connected voltage source converter-based power applications," *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 5, pp. 656–664, May 2015.
- [31] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, vol. 2014. The Red Book, IEEE Std., 2014.
- [21] C. Choeung, S. H. Park, B. K. Koh and Y. I. Lee, "Robust Tracking Control of a Three-Phase DC-AC Inverter for UPS Application under Unbalanced Load Conditions," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 27, pp. 278–283, 2016.
- [22] I. S. Mohamed, S. A. Zaid, M. F. Abu-Elyazeed and H. M. Elsayed, "Model predictive control-a simple and powerful method to control UPS inverter applications with output LC filter," in *2013 Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference*, 2013, pp. 1–6.
- [23] S. F. Ahmed, C. F. Azim, H. Desa and T. Hussain, "Model Predictive Controller-based, Single Phase Pulse Width Modulation (PWM) Inverter for UPS Systems," *Acta Polytech. Hungarica*, vol. 11, no. 6, pp. 23–38, 2014.
- [24] S. Vazquez, C. Montero, C. Bordons and L. G. Franquelo, "Design and Experimental Validation of a Model Predictive Control strategy for a VSI with Long Prediction Horizon," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, pp. 5788–5793.
- [25] P. J. Stolze, "Advanced Finite-Set Model Predictive Control for Power Electronics and Electrical Drives," *Technischen Universität München*, 2014.

زیر نویس ها

⁴ Luenberger Observer

⁵ Noise Rejection

¹ Uninterruptible Power Supply

² Dead Beat

³ Model Predictive Control