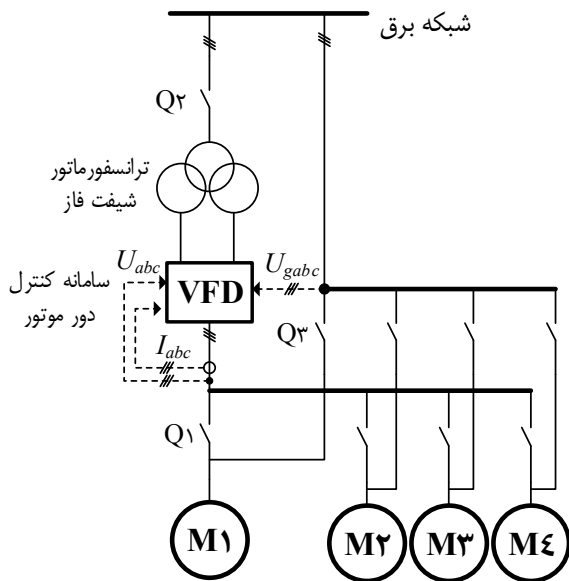


انتقال بدون وقفه دوطرفه موتور القایی میان اینورتر و شبکه برق با تصحیح مراجع کنترلی به کمک روش مبتنی بر تبدیل فوریه گسسته

علیرضا لاهوتی اشکوری، علی کشاورزبان، ایمان عبدلی، محمد فرزی و محمدرضا زینال‌الحسینی



شکل ۱: نمودار تک‌خطی راه‌اندازی و انتقال بدون وقفه چهار موتور الکتریکی از سامانه کنترل دور به شبکه و بالعکس.

سنتی قطع و راه‌اندازی مجدد با شبکه جدید، روش انتقال بدون وقفه دوطرفه امکان تغییر تغذیه یک مصرف‌کننده الکتریکی را بدون وقفه در تأمین توان الکتریکی برای آن فراهم می‌کند. این روش قابلیت مفید برای سایر کاربردهای مبتنی بر سامانه‌های کنترل دور موتورهای الکتریکی نیز است [۲].

شکل ۱ نمودار تک‌خطی طرحی را نشان می‌دهد که در آن چهار موتور الکتریکی، بلافاصله پس از راه‌اندازی و رسیدن به بسامد برابر با بسامد شبکه به‌طور مستقیم به شبکه متصل می‌شوند. یک راهکار، استفاده از چهار راه‌انداز نرم مستقل برای هر یک از موتورها است. این راه حل، اقتصادی نبوده و از سوی دیگر، امکان توقف نرم موتورها نیز میسر نیست. می‌توان با استفاده از یک سامانه کنترل دور مجهز به قابلیت انتقال همزمان دوطرفه، هر یک از چهار موتور را به‌ترتیب راه‌اندازی کرده و پس از همگام‌سازی دامنه، بسامد و فاز ولتاژ استاتور هر یک با شبکه برق، تغذیه آنها را به شبکه منتقل کرد. همچنین با این طرح می‌توان برای توقف نرم موتور الکتریکی نیز تغذیه هر یک را از شبکه به سامانه درایو منتقل کرده و آن را با شتابی مشخص متوقف کرد.

چالش اصلی انتقال بدون وقفه یک موتور الکتریکی آن است که در صورت رخداد وقفه اندک در جابه‌جایی منابع، سرعت موتور کاهش یافته و این انتقال با تنش الکتریکی و مکانیکی به موتور و شبکه همراه می‌شود. برای حل این مشکل، نیازمند موازی‌سازی دو منبع ولتاژ در یک لحظه کوتاه هستیم که در روش‌های قدیمی عمدتاً به کمک یک اندوکتانس

چکیده: این مقاله، یک روش جدید برای فراهم‌کردن امکان تغییر دوطرفه منبع تغذیه یک موتور القایی، میان اینورتر و شبکه برق بر پایه تبدیل فوریه گسسته ارائه می‌کند. در این الگو بدون تغییر در روش کنترل موتور و صرفاً با تصحیح مراجع مربوط به دامنه و بسامد (و یا با تصحیح مراجع شار و گشتاور بسته به روش کنترل)، شکل موج خروجی اینورتر متصل به موتور، هم‌فاز، هم‌دامنه و هم‌بسامد با شبکه برق شده و امکان تغییر منبع تغذیه موتور بدون وقفه فراهم می‌شود. به‌دلیل استخراج مؤلفه اصلی شکل موج‌های هر دو منبع برای تشخیص دامنه، بسامد و فاز، این روش در مقابل مؤلفه‌های مزاحم، DC و هارمونیک‌ها مقاوم است. به‌دلیل عدم استفاده از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتهایی در تعیین هر یک از مشخصه‌ها دیگر نیازی به تنظیم دشوار ضرایب آنها نیست. همچنین به خاطر دقت بالای همزمان‌سازی، موازی‌سازی لحظه‌ای منابع ولتاژ بدون نیاز به ادوات اضافه (سلف یا ترانسفورماتور) انجام شده و حداکثر جریان هجومی ناشی از موازی‌سازی در بدترین شرایط به کمتر از ۱/۵ برابر جریان نامی موتور محدود می‌گردد. این مقاله ضمن ارائه دقیق اصول روش پیشنهادی و مقایسه آن با برخی از الگوهای پیشین، از نتایج آزمایشگاهی برای ارزیابی دستاوردهای آن استفاده می‌نماید. نتایج تجربی، دستاوردهای فوق را تأیید می‌کند.

کلیدواژه: انتقال دوطرفه، کنترل دور موتور، تشخیص فاز، موتور القایی، تغییر منبع تغذیه، همگام‌سازی.

۱- مقدمه

انتقال همزمان دوطرفه یک موتور الکتریکی، فرایندی است که در آن امکان تغییر منبع تغذیه موتور بین دو شبکه (شبکه اصلی و پشتیبان) و بدون وقفه در عملکرد موتور به‌صورت برگشت‌پذیر فراهم می‌شود. تلاش برای رفع خطا و عملیات تعمیرات و نگهداری در هر یک از شبکه‌ها و فرایندهایی که حفظ پیوستگی آن اهمیت دارد، مانند صنایع فلزی، معدنی، انتقال آب و پتروشیمی از کاربردهای این روش است [۱]. برخلاف روش

این مقاله در تاریخ ۵ اردیبهشت ماه ۱۴۰۳ دریافت و در تاریخ ۲۷ شهریور ماه ۱۴۰۳ بازنگری شد.

علیرضا لاهوتی اشکوری (نویسنده مسئول)، پژوهشکده برق، سازمان جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، ایران، (email: a_lahootieshkevari@sbu.ac.ir).

علی کشاورزبان، پژوهشکده برق، سازمان جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، ایران، (email: a.keshavarzian@ut.ac.ir).

ایمان عبدلی، پژوهشکده برق، سازمان جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، ایران، (email: i_abdoli@sbu.ac.ir).

محمد فرزی پژوهشکده برق، سازمان جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، ایران، (email: m.farzi@acecr.ac.ir).

محمدرضا زینال‌الحسینی، پژوهشکده برق، سازمان جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، ایران، (email: s.m.r.zeinal@gmail.com).

استفاده نشده است، نیازی به تنظیم دشوار ضرایب این کنترل‌کننده‌ها نیست. علاوه بر این به جهت دقت بالای همگام‌سازی، موازی‌سازی لحظه‌ای منابع ولتاژ بدون نیاز به ادوات مغناطیسی اضافه (نظیر سلف یا ترانسفورماتور) محقق شده و حداکثر جریان گردشی احتمالی ناشی از موازی‌سازی در بدترین شرایط تخمین به کمتر از ۱/۵ برابر جریان نامی موتور محدود می‌گردد که در محدوده عملکرد عادی یک سامانه کنترل دور موتور الکتریکی است. در این مقاله، ضمن ارائه دقیق اصول روش پیشنهادی و مقایسه آن با برخی از الگوهای پیشین در بخش دوم، از نتایج آزمایشگاهی برای ارزیابی دستاوردهای آن در بخش سوم استفاده می‌شود. نتایج تجربی دستاوردهای فوق را تأیید می‌کنند.

۲- اصول عملکرد روش ارائه شده

۲-۱ تبدیل فوریه گسسته

تبدیل فوریه گسسته به عنوان یک نظریه ریاضی مهم در تبدیلات گسسته شناخته می‌شود که در تحلیل فوریه به کار می‌رود. این تبدیل، یک شکل موج نمونه‌برداری شده با دوره نمونه‌برداری یکسان را به دنباله‌ای از مؤلفه‌های بسامدی تبدیل می‌کند که هر یک نماینده یک مؤلفه بسامدی با دامنه‌ای معلوم است. لذا به کمک تبدیل فوریه گسسته می‌توان تمامی مؤلفه‌های بسامدی یک شکل موج را تا نرخ نایکوئیست یافت. طبق تعریف، تبدیل فوریه گسسته یک شکل موج با N نمونه برداشته شده در هر تناوب به صورت $\{y[k]\} = \{y[0], y[1], \dots, y[N-1]\}$ برابر است با

$$Y[k] = \sum_{i=0}^{N-1} y[i] e^{-j \frac{2\pi ki}{N}} \quad (1)$$

که در آن $Y[k]$ همان تبدیل فوریه گسسته $y[k]$ است. با استفاده از رابطه اوایلر، شکل دیگر (۱) به صورت (۲) است. همچنین تبدیل فوریه گسسته تبدیلی خطی و معکوس‌پذیر است که معکوس آن در (۳) ارائه شده است

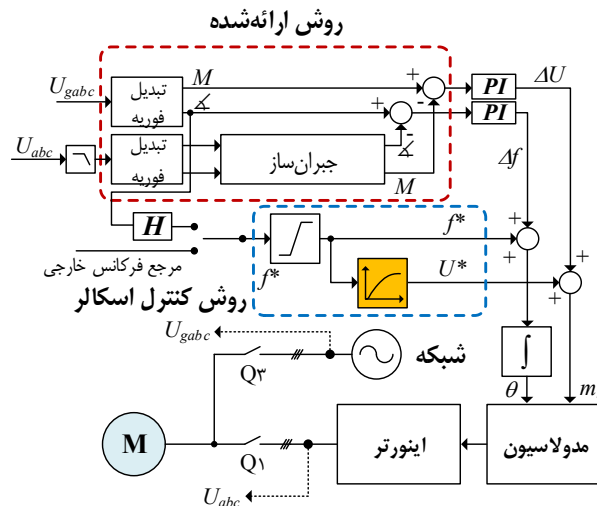
$$Y[k] = \sum_{i=0}^{N-1} y[i] \left(\cos \frac{2\pi ki}{N} - j \sin \frac{2\pi ki}{N} \right) \quad (2)$$

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Y[i] e^{j \frac{2\pi ni}{N}} \quad (3)$$

به کمک این تبدیل می‌توان مؤلفه اصلی هم‌بسامد با بسامد شبکه را استخراج نمود و بر اساس آن دامنه و فاز را نیز یافت. اصول روش انتقال بدون وقفه دوطرفه ارائه شده در این مقاله بر پایه این نظریه ریاضی است.

۲-۲ اصول روش انتقال بدون وقفه دوطرفه

مطابق شکل ۱، چهار موتور سه‌فاز به کمک دو کنتاکتور (یکی برای اتصال شبکه به آن و دیگری برای اتصال سامانه کنترل دور به موتور) در نظر گرفته شده است. برای راه‌اندازی نرم هر یک از موتورها (به‌عنوان نمونه موتور M_1)، کنتاکتور مربوط به اینورتر آن در حالی وصل می‌شود که کنتاکتور متصل‌کننده به شبکه قطع است. ولتاژ خط شبکه U_{gabc} و ولتاژ خط اینورتر U_{abc} نمونه‌برداری می‌شود. برای حذف مؤلفه‌های فرکانس بالای شکل موج نمونه‌برداری شده از ولتاژ اینورتر و شبکه می‌توان از یک فیلتر پایین‌گذر استفاده نمود. جریان خروجی اینورتر I_{abc} نیز برای مقاصد حفاظتی و کنترلی در انتقال بدون وقفه دوطرفه نمونه‌برداری می‌شود. شکل ۲ نمودار روش ارائه شده و نحوه اضافه شدن آن به روش کنترل اسکالر موتور القایی را نشان می‌دهد. نمونه‌های ولتاژ خط شبکه و



شکل ۲: نمودار روش ارائه شده.

اضافی (برای محدود کردن جریان‌های گردشی ناشی از انتقال) انجام می‌شد (مثلاً با استفاده از اندوکتانس نشستی ترانسفورماتور) [۳]. به دلیل شباهت روش انتقال بدون وقفه دوطرفه به نحوه همگام‌سازی اینورترهای متصل به شبکه، الگوهایی نظیر فیلتر با ضرایب چندگانه [۴]، حلقه قفل‌شده فاز مبتنی بر قاب مرجع گردان [۵]، حلقه قفل‌شده فاز مبتنی بر نوسان‌ساز کنترل‌شده با ولتاژ [۶]، انتگرال‌گیر مرتبه دوم پیوسته و گسسته [۷] و [۸]، روش تشخیص فاز مبتنی بر فیلتر حذف سیگنال تأخیر [۹]، فیلتر کالمن خطی [۱۰]، منطق فازی [۱۱]، فیلتر همه‌گذر [۱۲]، انتگرال‌گیر مرتبه دوم گسسته با حلقه کنترل داخلی [۱۳]، فیلتر با ضرایب چندگانه پیشرفته [۱۴] و روش تشخیص فاز مبتنی بر فیلتر حذف سیگنال تأخیر مراتب بالاتر [۱۵] ارائه شده که در تشخیص فاز و بسامد ولتاژ شبکه به‌دقت عمل می‌کنند. اما این روش‌ها فاقد حلقه قفل‌شده دامنه بوده و آلوده بودن ولتاژ شبکه به ولتاژ DC و انواع هارمونیک‌ها سبب کاهش دقت تخمین آنها می‌شود. با اضافه نمودن حلقه قفل‌شده دامنه به هر یک، بار محاسباتی آنها افزوده می‌شود. همچنین این روش‌ها (به‌ویژه روش‌های مبتنی بر فیلتر) بار محاسباتی بالایی دارند و اغلب دارای کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی هستند که تنظیم ضرایب آنها برای داشتن پاسخ دقیق بسیار دشوار است؛ در حالی که روش انتقال بدون وقفه دوطرفه باید به‌عنوان یک قابلیت جانبی در کنار الگوی اصلی کنترل موتور الکتریکی نظیر اسکالر و برداری [۱۶] و [۱۷] کار کند و در عملکرد عادی آن (از جمله سرعت محاسبات، مدولاسیون، حفاظت‌های داخلی و ارتباطات) تأثیر منفی نگذارد. بنابراین در هر یک از روش‌های یادشده نیازمند ادوات مغناطیسی اضافه نظیر سلف و ترانسفورماتور برای پیاده‌سازی انتقال بدون وقفه خواهیم بود که هزینه طرح را به‌طور قابل توجهی می‌افزاید.

در این مقاله، روشی جدید برای فراهم کردن امکان تغییر دوطرفه منبع تغذیه یک موتور القایی، میان اینورتر و شبکه برق (طرح شکل ۱) بر پایه تبدیل فوریه گسسته ارائه می‌شود. این الگو بدون تغییر در روش کنترل موتور، تنها با تصحیح مراجع مربوط به دامنه و بسامد در روش‌های کنترل موتور اسکالر و یا با تصحیح مراجع شار و گشتاور در روش‌های کنترل دور برداری، شکل موج خروجی اینورتر متصل به موتور را از لحاظ فاز، دامنه و بسامد با شبکه برق همگام می‌کند. با استخراج مؤلفه اصلی شکل موج‌های هر دو منبع برای تشخیص دامنه، بسامد و فاز، این روش در مقابل مؤلفه‌های مزاحم، DC و هارمونیک‌ها مقاوم است و چون از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی در تعیین هر یک از مشخصه‌های فوق

جدول ۱: تبدیلات مثلثاتی.

ϕ	$\sin \phi$	$\cos \phi$
$0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$	$\sin \phi$	$\sin(\frac{\pi}{2} - \phi)$
$\frac{\pi}{2} < \phi \leq \pi$	$\sin(\pi - \phi)$	$-\sin(\phi - \frac{\pi}{2})$
$\pi < \phi \leq \frac{3\pi}{2}$	$-\sin(\phi - \pi)$	$-\sin(\frac{3\pi}{2} - \phi)$
$\frac{3\pi}{2} < \phi < 2\pi$	$-\sin(2\pi - \phi)$	$\sin(\phi - \frac{3\pi}{2})$

پیش تعریف شده با ربع تناوب به همراه جدول ۱ استفاده شده است؛ بنابراین استفاده از فضای حافظه به شکل قابل توجهی بهبود یافته است. شایان ذکر است که روش ارائه شده تأثیری در عملکرد عادی کنترل دور موتور نداشته و بنابراین بر روی مشخصات گشتاور، شار و هارمونیک جریان در حالت عادی کنترل دور موتور تأثیری ندارد. بنابراین این روش با اضافه شدن به روش کنترل دور موتور الکتریکی، قابلیت انتقال موتور به شبکه از اینورتر و تحویل آن از شبکه به اینورتر را فراهم می کند. در شرایط عادی برای کنترل موتور از بسامد مرجع خارجی مطابق شکل ۲ استفاده می شود؛ اما در هنگام همگام سازی، بسامد مرجع از روی فاز ولتاژ شبکه تعیین می شود. شکل های ۴-الف و ۴-ب شیوه های ادغام این روش به روش کنترل برداری موتور الکتریکی و روش اسکالر حلقه بسته را نشان می دهند. در روش کنترل برداری، کفایت مراجع تصحیح کننده دامنه و بسامد (ΔU و Δf) به ترتیب مرجع شار (i_d^*) و مرجع گشتاور (i_q^*) را تصحیح کنند. در روش کنترل اسکالر حلقه بسته، مراجع تصحیح کننده همانند شکل ۲ برای اصلاح اندیس مدولاسیون دامنه و مرجع بسامد به خدمت گرفته می شوند.

۲-۳ شرایط انتقال بدون وقفه دوطرفه

۲-۳-۱ انتقال موتور از سامانه کنترل دور به شبکه

برای انتقال موتور الکتریکی به شبکه، ابتدا سامانه کنترل دور موتور با تشخیص برخط بسامد شبکه و با استفاده از روش کنترلی (در اینجا روش اسکالر تشریح شده است) اقدام به راه اندازی موتور و رساندن آن به سرعت نامی می کند. سپس با استفاده از روش ارائه شده با تصحیح اندیس های مدولاسیون دامنه و بسامد اقدام به همگام سازی دامنه، بسامد و فاز شکل موج ولتاژ اعمالی به استاتور موتور با شبکه برق می نماید. هنگامی که خطای دامنه و فاز به کمتر از مقادیر از پیش تعیین شده برسد، مطابق شکل ۲، کنتاکتور Q_2 را نیز وصل می کند. در این شرایط موتور الکتریکی همزمان دو منبع ولتاژ را می بیند که به واسطه یکسان بودن مشخصات الکتریکی آنها انتظار می رود هر یک نیمه از توان مورد نیاز موتور را به صورت لحظه ای تأمین کنند. پس از گذشت لحظه ای کوتاه از این موازی سازی، فرمان قطع کنتاکتور Q_1 صادر می شود و در نتیجه انتقال بدون وقفه از سامانه کنترل دور موتور به شبکه تکمیل می شود. سامانه کنترل دور نیز به حالت آماده به کار تغییر وضعیت می دهد.

۲-۳-۲ انتقال موتور از شبکه به سامانه کنترل دور

برای انتقال موتور الکتریکی از شبکه به سامانه کنترل دور موتور با هدف کنترل سرعت و گشتاور و یا توقف نرم، ابتدا در حالی که کنتاکتورهای Q_2 روشن و Q_1 خاموش است، سامانه کنترل دور از حالت آماده به کار خارج شده و با استفاده از روش ارائه شده، ولتاژی همگام با شبکه برق از دیدگاه دامنه، بسامد و فاز تولید می کند. هنگامی که خطای

Function H (Grid_Voltage_Phase)

Begin :

Phase [k] = Grid_Voltage_Phase

If (|Phase [k] - Phase [k-1]| < π)

x = (Phase [k] - Phase [k-1]) / (2π * T_d)

Frequency[k] = a * x + (1 - a) Frequency [k-1]

Frequency[k-1] = Frequency[k]

Else

Frequency[k] = Frequency[k-1]

End If

Phase[k-1] = Phase[k]

return Frequency[k]

End

شکل ۳: برنامه تبدیل بسامد به فاز.

ولتاژ خط اینورتر به دو بلوک تبدیل فوریه گسسته داده می شود تا دامنه و فاز هر یک استخراج گردد. برای محاسبه دامنه و فاز از (۴) استفاده می شود

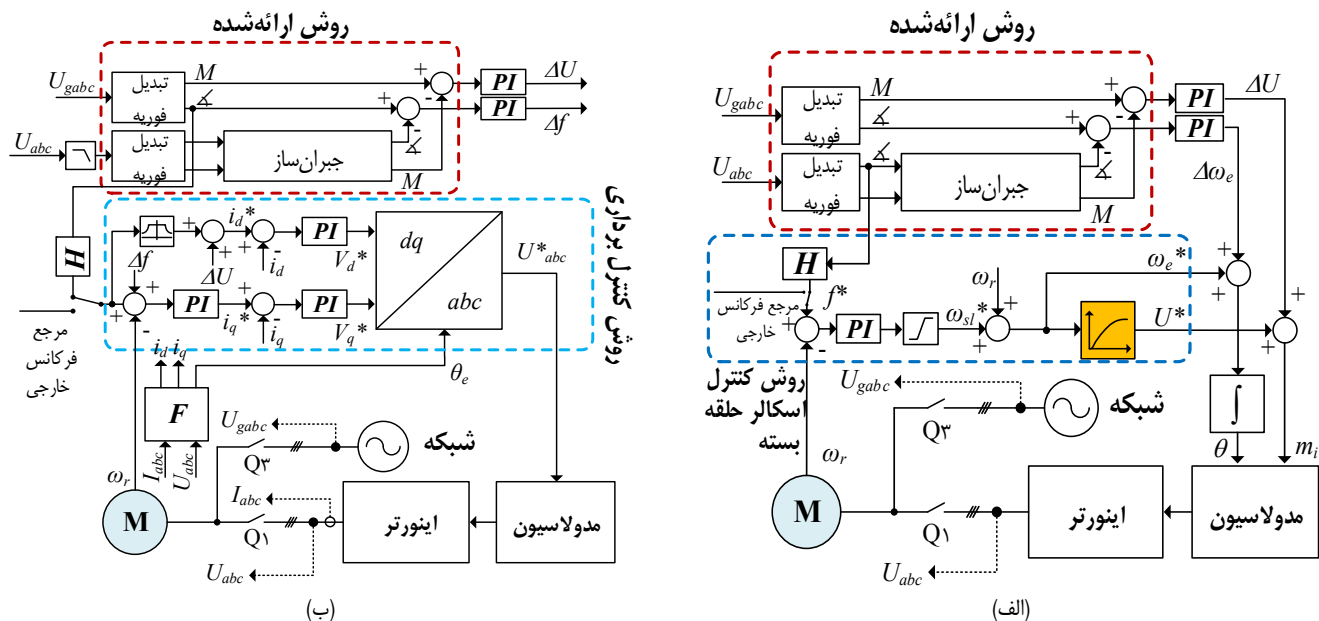
$$\begin{cases} M = \frac{2}{N} \sqrt{Y_S^2 + Y_C^2} \\ \angle = \tan^{-1} \frac{Y_S}{Y_C} \end{cases} \quad (4)$$

که در آن $F_S[k]$ و $F_C[k]$ از رابطه تبدیل فوریه (۵) محاسبه می گردد

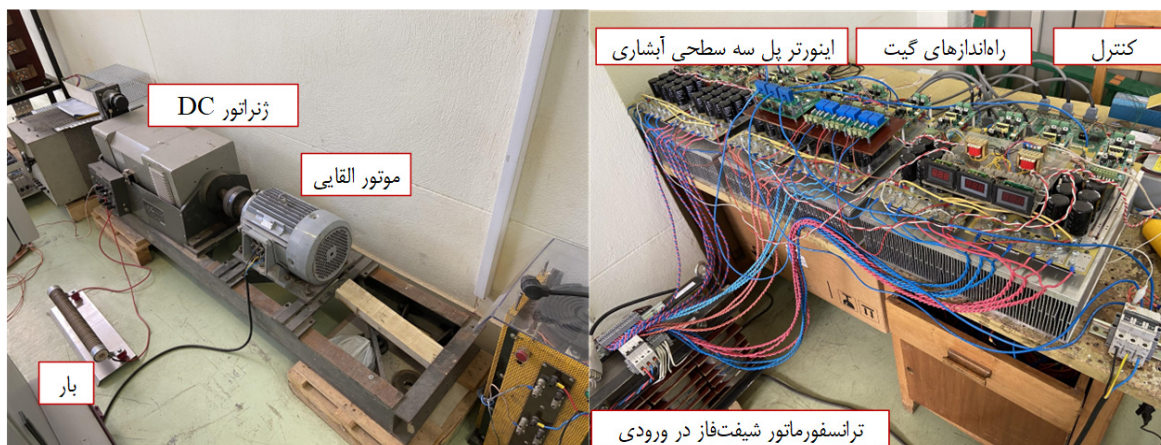
$$\begin{cases} Y_S = \sum_{i=0}^{N-1} f[i] \sin(2\pi \frac{i}{N}) \\ Y_C = \sum_{i=0}^{N-1} f[i] \cos(2\pi \frac{i}{N}) \end{cases} \quad (5)$$

برای محاسبه بسامد ولتاژ شبکه از روی فاز محاسبه شده از برنامه واسط H مطابق شکل ۳ استفاده شده که در آن T_d زمان نمونه برداری و a برابر با نسبت T_d به T_a است که T_a ثابت زمانی فیلتر است. بسامد محاسبه شده، بسامد ولتاژ شبکه است که به عنوان بسامد مرجع به روش کنترل اسکالر داده شده و با رعایت اصل ثبات نسبت ولتاژ- بسامد برای یک موتور القایی، اندیس مدولاسیون نیز محاسبه می شود. دامنه و فاز محاسبه شده برای شکل موج ولتاژ شبکه به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و با دامنه و فاز محاسبه شده برای ولتاژ اینورتر مقایسه می گردد. از آنجا که باید ولتاژ خروجی اینورتر برای انتقال بدون وقفه دوطرفه با ولتاژ شبکه از دیدگاه دامنه، فاز و بسامد همگام شود، خطای مقایسه مذکور باید صفر گردد. برای صفر شدن خطا از اندیس مدولاسیون دامنه و بسامد اینورتر استفاده می شود. به منظور الحاق روش ارائه شده به روش کنترل موتور، خروجی خطای محاسبه شده به دو کنترل کننده تناسبی- انتگرالی داده می شود. شایان ذکر است که این دو کنترل کننده، جزء روش تخمین دامنه، فاز و بسامد ارائه شده نیست و صرفاً جهت الحاق این روش به هر نوع روش کنترل دور موتور استفاده شده است. کنترل کننده فاز، موج تصحیح کننده مرجع بسامد را و کنترل کننده دامنه موج، تصحیح کننده اندیس مدولاسیون دامنه را می سازد.

تبدیل فوریه گسسته بار محاسباتی را کاهش می دهد؛ اما یک روش مبتنی بر حافظه است. در حالت عادی آرایه های از پیش تعیین شده برای توابع سینوس و کسینوس با $2N$ نمونه برای موجی با N نمونه برداشته شده لازم است. در روش پیاده سازی شده به جای استفاده از $2N$ فضای حافظه برای توابع سینوس و کسینوس، از یک آرایه سینوس از



شکل ۴: ادغام روش ارائه شده با (الف) طرح روش کنترلی موتور الکتریکی و (ب) طرح روش کنترلی حلقه بسته اسکالر.



شکل ۵: تصویری از بستر آزمایشگاهی.

شده و دیگر نیازی به تنظیم ضرایب آنها نیست. کیفیت تنظیم ضرایب کنترل کننده ها و فیلترها در سایر روش ها نظیر [۴]، [۱۰] و [۱۸] سبب کاهش محسوس دقت تخمین فاز می شود. - دقت بالای تخمین دامنه و فاز و در نتیجه محاسبه دقیق بسامد ولتاژ شبکه موجب فراهم شدن امکان موازی سازی لحظه ای دو منبع در هنگام تکمیل همگام سازی، بدون نیاز به ادوات مغناطیسی اضافه شده است.

جدول ۲، چند روش متداول را از دیدگاه صرف حافظه و بار محاسباتی با روش ارائه شده مقایسه می کند. اگرچه روش ارائه شده، حافظه محور است، تعداد عملگرهای ریاضی مورد نیاز آن بسیار کمتر از روش انتگرال گیر مرتبه دوم [۸] و [۱۳]، حلقه قفل شده فاز برداری [۱۸] و حلقه قفل شده فاز مبتنی بر قاب مرجع گردان [۵] می باشد. بدیهی است که کاهش تعداد عملگرهای ریاضی، کاهش بار محاسباتی را در پی دارد.

۳- نتایج آزمایشگاهی

در این بخش، روش ارائه شده به کمک یک بستر آزمایشگاهی ارزیابی می گردد. این بستر، شامل سامانه کنترلی دور موتور بوده که مبتنی بر ساختار پل سه سطحی آبخاری است و یک موتور القایی ۷/۵ کیلوواتی را طبق شکل ۵ تغذیه می کند. مشخصات بستر آزمایشگاهی در جدول ۳ آمده

مراجع تصحیح (ΔU و Δf) به کمتر از مقادیری از پیش تعیین شده رسیدند، فرمان وصل کلید Q_1 صادر شده و برای مدتی بسیار کوتاه شبکه و اینورتر موازی می شوند. انتظار می رود که به دلیل دقت تخمین، تنش مکانیکی و الکتریکی برای موتور حاصل نشود. سپس فرمان قطع Q_1 صادر می شود و در نتیجه انتقال بدون وقفه از شبکه به سامانه کنترلی دور تکمیل می شود.

۲-۴ مقایسه روش ارائه شده با سایر روش ها

روش انتقال بدون وقفه دوطرفه ارائه شده در این مقاله بر اساس نظریه تبدیل فوریه گسسته توسعه داده شده است. این روش مزیت های ذیل را دارد:

- استفاده از تبدیل فوریه گسسته و استخراج مؤلفه اصلی شکل موج ها پایداری این روش را تضمین می کند. همچنین مقاومت آن را در برابر آلوده بودن ولتاژ به هارمونیک و موج DC می افزاید.
- روش ارائه شده، حلقه قفل فاز و قفل دامنه را به صورت یکپارچه دارد. در مقابل، حلقه های قفل شده فاز مرسوم نیازمند اضافه شدن حلقه قفل دامنه نیز هستند.
- در این روش، در تخمین دامنه و فاز از کنترل کننده های تناسبی-انتگرالی استفاده نشده است؛ بنابراین تأخیرات ناشی از آنها حذف

جدول ۲: مقایسه بار محاسباتی و اشغال حافظه میان روش ارائه شده و برخی روش های دیگر.

روش ارائه شده	روش انتگرال گیر مرتبه دوم [۸] و [۱۳]	حلقه قفل شده فاز برداری [۱۸]	حلقه قفل شده مبتنی بر قاب مرجع گردان [۵]
ثابت های اعشاری	$N + 5$	۲	۳
مصرف حافظه	$4N + 2$	۶	۱۵
متغیرهای عدد صحیح	۱	۰	۰
جمع کننده	۸	۱۵	۹
ضرب	۷	۱۹	۱۲
تابع سینوس و کسینوس	۰	۰	۶
تایم بار محاسباتی	۰	۰	۰
تأخرات معکوس	۱	۱	۰
رادیکال	۱	۱	۰

جدول ۳: مشخصات بستر آزمایشگاهی.

مشخصه ها	مقادیر
ولتاژ شبکه	۴۰۰ V سه فاز
ولتاژ AC خروجی	۴۰۰ V سه فاز
بسامد کلیدزنی	۱۲۰۰ Hz
تعداد نمونه در هر دوره (بسامد شبکه)	۲۴
خطای فاز	۰٫۰۵ rad
خطای دامنه	۵٪
بسامد نامی شبکه و موتور	۵۰ Hz
توان خروجی	۷٫۵ kW
تعداد سطوح اینورتر	۵ سطحی
نمونه بردارهای ولتاژ	LV۲۵
نمونه بردارهای جریان	LA۵۵
راه اندازهای گیت	HCPL۳۱۶
بار اهمی	۲ اهم مقاومت نیکل کروم
IGBT	FF۴۵۰R۱۷KT۴
دیودهای یکسوساز	VUO۹۶

نشان داده شده است. مطابق با شکل ۶-الف، پیش از اعمال فرمان همگام سازی، کنتاکتور اینورتر در حالت وصل بوده و موتور را تغذیه می کند. کنتاکتور اتصال موتور به شبکه قطع است. مطابق شکل ۶-ب، سامانه کنترل دور موتور پس از دریافت فرمان همگام سازی اقدام به همگام کردن ولتاژ خروجی خود با شبکه از لحاظ دامنه، فاز و بسامد می کند. در شکل ۶-ج، پس از تکمیل فرایند همگام سازی که ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ شبکه روی هم افتاده اند، ابتدا کنتاکتور متصل کننده موتور به شبکه وصل شده و پس از مدت کوتاهی کنتاکتور اینورتر قطع و همچنین ولتاژ خروجی آن صفر می شود.

۳-۲ عملکرد همگام سازی و بازگشت موتور به اینورتر

شکل ۷-الف وضعیت ولتاژهای اینورتر و شبکه و همچنین وضعیت قطع/وصل بودن کنتاکتورهای اینورتر و شبکه را پیش از اعمال فرمان همگام سازی و بازگشت تغذیه موتور به اینورتر نشان می دهد. شکل ۷-ب وضعیت ولتاژهای اینورتر و شبکه را در حین فرایند همگام سازی و شکل ۷-ج، تغییرات سیستم در لحظه اتمام فرایند بازگشت موتور به اینورتر را نشان می دهد. بر این اساس پیش از اعمال فرمان، کنتاکتور متصل کننده موتور به اینورتر باز و موتور به طور مستقیم به شبکه وصل است. ولتاژ خروجی اینورتر نیز صفر است. پس از صدور فرمان، مدار کنترل ابتدا دامنه، فاز و بسامد مرجع را تخمین زده و سپس اقدام به تولید ولتاژ خروجی خود می کند. در پایان پس از اتمام فرایند همگام سازی ولتاژ اینورتر با ولتاژ شبکه، کنتاکتور متصل کننده موتور به سامانه کنترل دور وصل شده و برای لحظه کوتاهی این سامانه با شبکه موازی می شود. سپس کنتاکتور شبکه بازمی گردد.

۳-۳ عملکرد همگام سازی فرکانسی

در روش ارائه شده، نه تنها دامنه و فاز ولتاژهای اینورتر و شبکه همگام می شود، بلکه بسامد ولتاژهای مذکور نیز یکسان می گردد. بسامد ولتاژ خروجی اینورتر یک درجه آزادی برای تنظیم و تصحیح فاز ولتاژ آن است. به همین منظور، ابتدا موتور با اینورتر تا بسامد دلخواه ۳۷٫۶ هرتز راه اندازی می شود که در شکل ۸-الف نمایش داده شده است. پس از اعمال فرمان همگام سازی، مطابق شکل ۸-ب، بسامد ولتاژ خروجی اینورتر با شتاب مشخصی که الگوی کنترل اسکالر تعیین می کند به بسامد ولتاژ شبکه می رسد. بسامد سنج نوسان نما دقت تشخیص فرکانس را تأیید می کند.

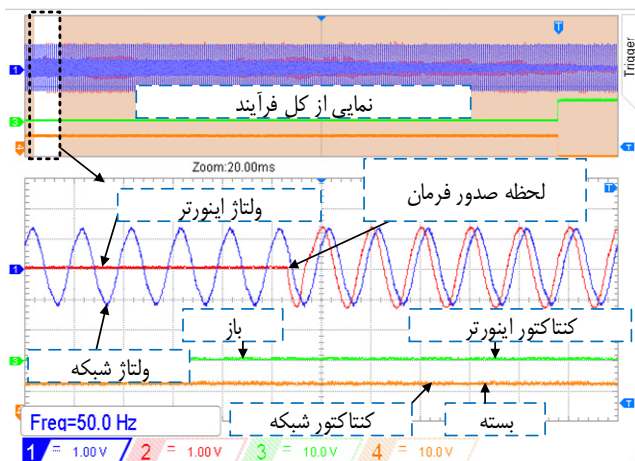
۳-۴ جریان گردشی اینورتر و شبکه

نشان داده شد که در حالت گذرای فرایند انتقال، شبکه و سامانه کنترل دور در یک لحظه کوتاه موازی می شوند که این موازی سازی در روش های

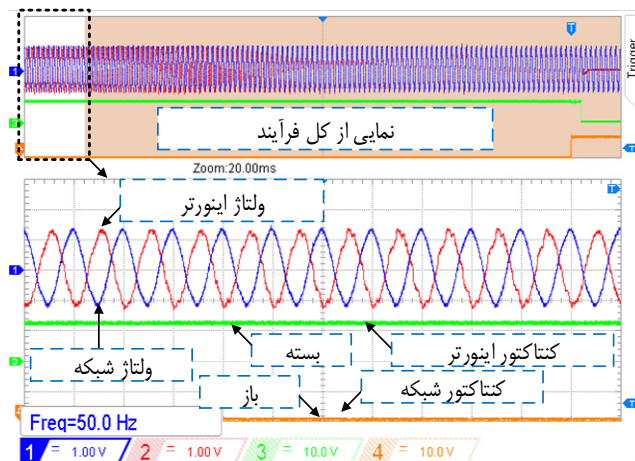
است. بستر آزمایشگاهی بر اساس طرح شکل ۲ ساخته شده؛ به طوری که یک کنتاکتور برای اتصال شبکه به موتور و یک کنتاکتور برای اتصال خروجی سامانه کنترل دور به موتور الکتریکی در نظر گرفته شده است. این بستر توسط یک مدار کنترلی مبتنی بر پردازنده TMS۳۲۰F۲۸۳۳۵ کنترل می شود. نمونه های ولتاژ و جریان طبق شکل ۲ به واحد تبدیل آنالوگ به دیجیتال این مدار کنترلی به کمک ترانس دیوسرهای LV۲۵ و LA۵۵ داده می شود. نمونه برداری از ولتاژهای اینورتر و شبکه به کمک فیلتر پایین گذر یکسان انجام می شود. موتور القایی به یک ژنراتور DC با تحریک مستقل، متصل گردیده و خروجی آن به یک بار مقاومتی نیکل کرومی ۲ اهمی وصل شده است. در این بخش انتقال موتور از اینورتر به شبکه و بالعکس و حالات گذرا در هر یک از این فرایندها به کمک نتایج آزمایشگاهی بررسی می شود. برای ثبت نتایج از نوسان نمای RIGOL-DS۱۰۵۴Z استفاده شده است.

۳-۱ عملکرد همگام سازی و انتقال موتور به شبکه

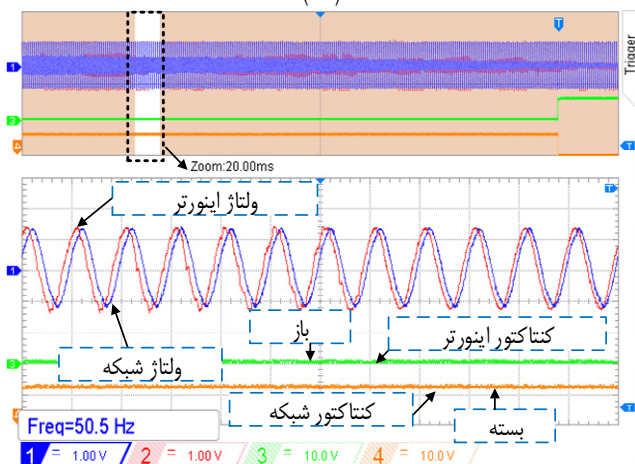
شکل ۶ فرایند همگام سازی و انتقال موتور از اینورتر به شبکه را پس از صادر شدن فرمان آن نشان می دهد. شکل ۶-الف وضعیت ولتاژ اینورتر و ولتاژ شبکه را قبل از صدور فرمان، شکل ۶-ب وضعیت ولتاژ اینورتر را بعد از صدور فرمان و شکل ۶-ج نحوه تکمیل فرایند همگام سازی موتور با شبکه و انتقال آن به شبکه را نشان می دهد. در تمامی این تصاویر، وضعیت قطع یا وصل بودن کنتاکتور متصل به سامانه کنترل دور و شبکه



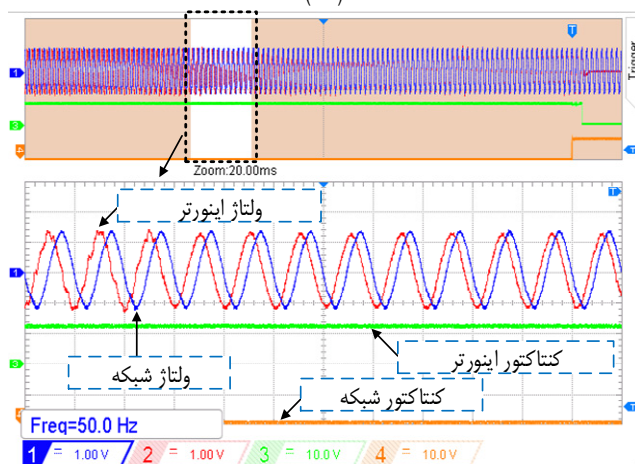
(الف)



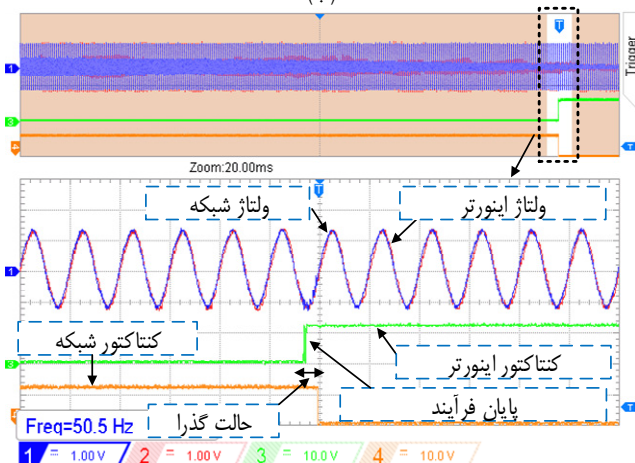
(الف)



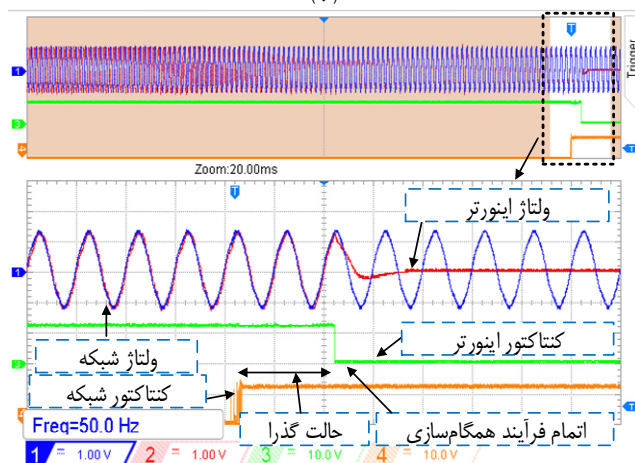
(ب)



(ب)



(ج)



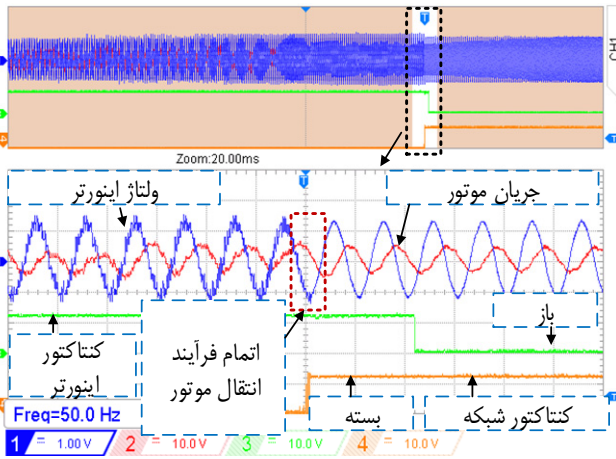
(ج)

شکل ۷: نتایج آزمایشگاهی عملکرد همگام‌سازی و انتقال موتور به اینورتر، (الف) ولتاژهای اینورتر و شبکه قبل از فرمان، (ب) ولتاژ اینورتر و شبکه پس از فرمان و (ج) تکمیل فرآیند.

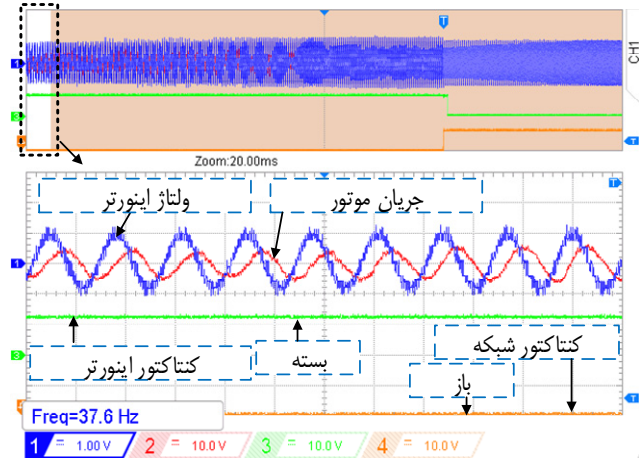
شکل ۶: نتایج آزمایشگاهی عملکرد همگام‌سازی و انتقال موتور به شبکه، (الف) ولتاژهای اینورتر و شبکه قبل از فرمان، (ب) ولتاژ اینورتر و شبکه پس از فرمان و (ج) تکمیل فرآیند.

لحظه گذر از صفر ولتاژ خط است. در شکل ۹-ب، جریان گردشی لحظه‌ای با دامنه حداکثر ۱/۵ برابر جریان نامی مشاهده می‌شود. این حالت مربوط به انتقال موتور از اینورتر به شبکه در لحظه‌ای غیر از صفر ولتاژ خط است. این عدد در محدوده عملکرد یک سامانه کنترل دور موتور بوده؛ زیرا این سامانه جریان هجومی راه‌اندازی موتور را از حدود ۸ برابر به ۱/۵ برابر جریان نامی موتور محدود می‌کند. این نتایج نشان می‌دهند که دقت همگام‌سازی به گونه‌ای است که جریان‌های گردشی و هجومی ناشی از موازی‌سازی شبکه و سامانه کنترل دور، فراتر از محدوده مجاز نمی‌رود.

سنٹی به واسطه یک سلف یا ترانسفورماتور صورت می‌گرفت. در این مقاله، عدم نیاز به استفاده از ادوات مغناطیسی برای این فرآیند به‌عنوان یکی از ویژگی‌های برجسته روش ارائه‌شده بیان شد. در اینجا به کمک دو آزمایش به صورت تجربی نشان داده می‌شود که جریان اینورتر در حالت گذرا چگونه است. انجام فرآیند انتقال می‌تواند در لحظه گذر از صفر ولتاژ خط و یا لحظات غیرصفر صورت گیرد. شکل ۹-الف حالتی را نشان می‌دهد که جریان گردشی بین اینورتر و شبکه در لحظه موازی‌شدن این دو صفر است. این حالت مربوط به انتقال موتور از اینورتر به شبکه در

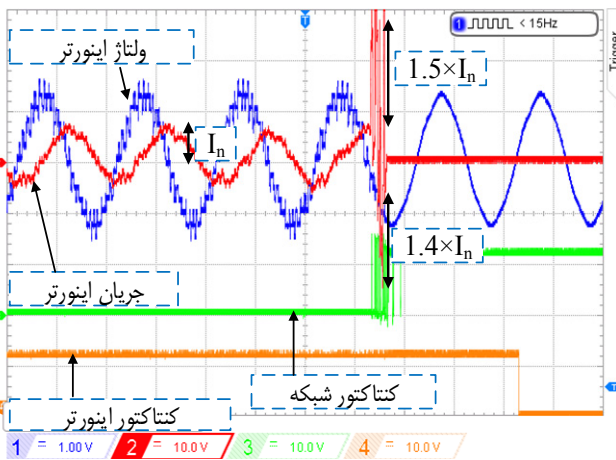


(ب)

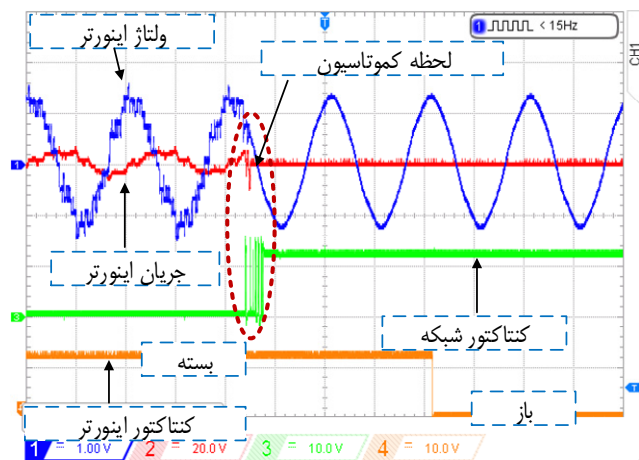


(الف)

شکل ۸: نتایج آزمایشگاهی همگام‌سازی فرکانس، (الف) ولتاژ و جریان موتور قبل از فرایند در بسامد ۳۷٫۶ هرتز و (ب) ولتاژ و جریان موتور پس از فرایند در بسامد ۵۰ هرتز و اتمام فرایند.

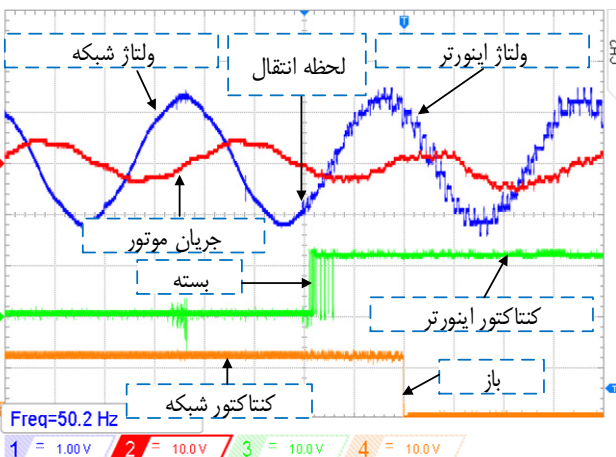


(ب)

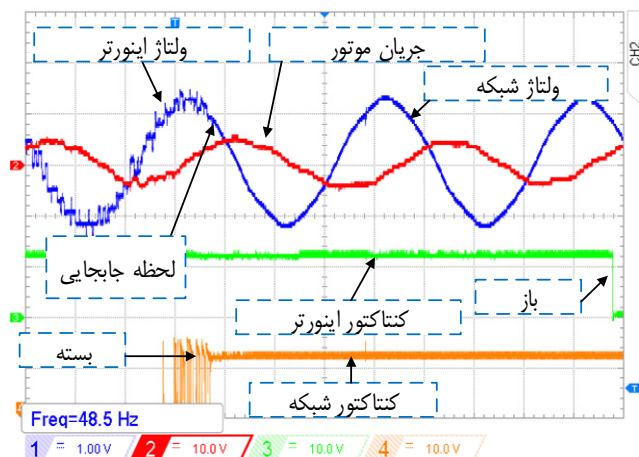


(الف)

شکل ۹: نتایج آزمایشگاهی حالت گذرا، (الف) جریان اینورتر در جابه‌جایی در نقطه گذر از صفر ولتاژ و (ب) جریان اینورتر در جابه‌جایی غیر از نقطه گذر از صفر ولتاژ.



(ب)



(الف)

شکل ۱۰: نتایج آزمایشگاهی حالت گذرای جریان موتور، (الف) انتقال موتور از اینورتر به شبکه و (ب) بازگشت موتور از شبکه به اینورتر.

بازگشت از شبکه به سامانه کنترل دور نمایش می‌دهد. جریان موتور بدون تغییر است که نشان از دقت بالای همگام‌سازی است. نتایج آزمایشگاهی عملکرد این روش را تأیید می‌کنند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش جدید برای فراهم‌کردن امکان تغییر دوطرفه

۳-۵ جریان حالت گذرای موتور

در بخش ۳-۴ جریان حالت گذرای اینورتر که در لحظه‌ای موازی با شبکه می‌شود، نشان داده شد. در این فرایند، موتور بدون افت سرعت جابه‌جا می‌شود. برای اثبات این مدعا شکل ۱۰-الف، جریان موتور را هنگام انتقال آن از اینورتر به شبکه و شکل ۱۰-ب، جریان موتور را حین

- analysis, and comparative evaluation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 4, pp. 3558-3572, Apr. 2020.
- [13] A. Ranjan, S. Kewat, and B. Singh, "DSOGI-PLL with in-loop filter based solar grid interfaced system for alleviating power quality problems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 1, pp. 730-740, Jan./Feb. 2021.
- [14] Z. Zhang, et al., "An adaptive enhanced complex-coefficient filter-based PLL in variable frequency grid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 39, no. 4, pp. 3950-3955, Apr. 2024.
- [15] F. Sevilmiş, H. Karaca, and H. Ahmed, "High-order delayed signal cancellation-based PLL under harmonically distorted grid voltages," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, 9 pp., 2023.
- [16] X. M. Jia and S. S. Choi, "Design of Volts per Hertz limiter with consideration of the under-excitation limiter control actions," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, no. 2, pp. 140-147, Jun. 2001.
- [17] L. Xiong, et al., "Virtual field-orientated control for doubly salient electromagnetic machine with torque ripple reduction," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 39, no. 1, pp. 1378-1393, Jan. 2024.
- [18] N. Beniwal, I. Hussain, and B. Singh, "Vector-based synchronization method for grid integration of solar PV-battery system," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 15, no. 9, pp. 4923-4933, Sept. 2019.

علیرضا لاهوتی اشکوری تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ در رشته مهندسی برق در دانشگاه علم و فرهنگ تهران و مقطع دکتری تخصصی را در سال ۱۴۰۰ در رشته مهندسی برق در دانشگاه شهید بهشتی به پایان رسانده است. او از سال ۱۳۹۳ در پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی در سمت پژوهشگر مشغول به فعالیت علمی بوده و همچنین از سال ۱۳۹۳ به عنوان مدرس دانشگاه مشغول به تدریس است. دکتر لاهوتی اشکوری در سال ۱۴۰۱ به عنوان پژوهشگر نمونه دانشگاه شهید بهشتی انتخاب گردید. زمینه تحقیقاتی مورد علاقه او آنالیز، مدل‌سازی، طراحی و کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت است.

علی کشاورزبان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد رشته برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ از دانشکده فنی دانشگاه تهران به پایان رسانده است و از سال ۱۳۹۳ در پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی مشغول به فعالیت گردید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: مبدل‌های الکترونیک قدرت، درایو موتورهای صنعتی و انرژی‌های تجدید پذیر.

ایمان عبدلی در سال ۱۳۹۵ مدرک کارشناسی و در سال ۱۳۹۷ کارشناسی ارشد خود را به ترتیب در رشته‌های الکترونیک و الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی از دانشگاه علم و فرهنگ تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۹۷ به دوره دکترای مهندسی برق الکترونیک قدرت در دانشگاه شهید بهشتی وارد گردید و در سال ۱۴۰۲ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق الکترونیک قدرت از دانشگاه مذکور گردید. از سال ۱۳۹۸ تاکنون به عنوان کارشناس ارشد پژوهشی الکترونیک قدرت در جهاد دانشگاهی به کار مشغول می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند مبدل‌های الکترونیک قدرت، انرژی‌های تجدید پذیر، کیفیت توان و درایو الکتروموتورهای دور متغیر می‌باشد.

محمد فرزوی در سال ۱۳۷۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق الکترونیک خود را از دانشگاه علم و صنعت و در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی خود را از همین دانشگاه دریافت نمود. از سال ۱۳۷۴ الی ۱۳۸۵ نام‌برده به عنوان کارشناس ارشد طراحی و تولید در جهاد دانشگاهی واحد علم و صنعت به کار مشغول بوده و از سال ۱۳۸۵ تاکنون به عنوان عضو هیأت علمی و مدیر پروژه‌های پژوهشی و صنعتی متعدد از جمله قطار ملی فعالیت‌های علمی خود را در پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی دنبال کرده است و اینک نیز با عنوان مدیر گروه پژوهشی منابع تغذیه صنعتی در این پژوهشکده مشغول فعالیت است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان عمدتاً حوزه الکترونیک قدرت شامل موضوعاتی مانند مبدل‌های الکترونیک قدرت، کنترل دور موتورهای الکتریکی، سیستم رانش در قطارهای مترو، رکتیفایرهای جریان بالا و اینورترهای متصل به شبکه می‌باشد.

محمد رضا زینال‌الحسینی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به ترتیب در دانشگاه علم و فرهنگ تهران و دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است. زمینه تحقیقاتی مورد علاقه او طراحی مبدل‌های الکترونیک قدرت از جمله مبدل‌های رزونانسی می‌باشد.

منبع تغذیه یک موتور الکتریکی، میان سامانه کنترل دور موتور و شبکه برق بر پایه تبدیل فوریه گسسته ارائه شد. این روش، بدون تغییر در شیوه کنترل موتور و تنها با تصحیح مراجع مربوط به دامنه و بسامد در روش‌های اسکالر و یا با تصحیح مراجع شار و گشتاور در روش‌های برداری، شکل موج خروجی اینورتر را از لحاظ فاز، دامنه و بسامد با شبکه همگام می‌کند که در نتیجه، انتقال بدون وقفه منبع تغذیه موتور فراهم می‌شود. نشان داده شد که جهت عدم استفاده از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی در تخمین دامنه و فاز، دیگر نیازی به تنظیم دشوار ضرایب آنها نیست. به خاطر دقت بالای همگام‌سازی نیز موازی‌سازی لحظه‌ای اینورتر و شبکه بدون نیاز به ادوات اضافه انجام شد. نتایج آزمایشگاهی حکایت دارد که موتور بدون تنش الکتریکی و مکانیکی از سامانه کنترل دور به شبکه و بالعکس جابه‌جا می‌شود. همچنین جریان حالت گذرای موازی‌شدن اینورتر و شبکه به حداکثر ۱/۵ برابر جریان نامی سیستم که در محدوده مجاز آن است، محدود می‌شود. همچنین به دلیل عدم وقفه در عملکرد موتور، بر روی جریان موتور تأثیری ندارد. مقایسه با سایر روش‌ها حکایت از کاهش تعداد عملگرهای محاسباتی دارد که در نتیجه سرعت اجرای این الگوریتم را افزایش و بار محاسباتی را می‌کاهد. این روش برای تمامی سامانه‌های کنترل دور موتور و صرف نظر از نوع ساختار و الگوریتم کنترل موتور قابل پیاده‌سازی و اجراست.

مراجع

- [1] T. R. Beckwith and W. G. Hartmann, "Motor bus transfer: considerations and methods," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 2, pp. 602-611, Mar./Apr. 2006.
- [2] P. K. Muralimanohar, D. Haas, J. R. McClanahan, R. T. Jagaduri, and S. Singletary, "Implementation of a microprocessor-based motor bus transfer scheme," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 4, pp. 4001-4008, Jul./Aug. 2018.
- [3] M. V. V. S. Yalla, A. Vakili, and T. R. Beckwith, "Calculation of transient torques on motors during a residual voltage motor bus transfer," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 6, pp. 6104-6116, Nov.-Dec. 2020.
- [4] X. Guo, W. Wu, and Z. Chen, "Multiple-complex coefficient-filter-based phase-locked loop and synchronization technique for three-phase grid-interfaced converters in distributed utility networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1194-1204, Apr. 2010.
- [5] S. Golestan, M. Monfared, and F. D. Freijedo, "Design-oriented study of advanced synchronous reference frame phase-locked loops," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 2, pp. 765-778, Feb. 2012.
- [6] A. A. Ahmad, M. Pichan, and A. Abrishamifar, "A new simple structure PLL for both single and three phase applications," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 74, pp. 118-125, Jan. 2016.
- [7] B. Misra and B. Nayak, "Second order generalized integrator based synchronization technique for polluted grid conditions," in *Proc. 2nd Int. Conf. for Convergence in Technology*, pp. 1080-1084, Mumbai, India, 7-9 Apr. 2017.
- [8] Q. Yan, R. Zhao, X. Yuan, W. Ma, and J. He, "A DSOGI-FLL-based dead-time elimination PWM for three-phase power converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 3, pp. 2805-2818, Mar. 2019.
- [9] S. Golestan, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Hybrid adaptive/nonadaptive delayed signal cancellation-based phase-locked loop," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 1, pp. 470-479, Jan. 2017.
- [10] S. Golestan, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Steady-state linear Kalman filter-based PLLs for power applications: a second look," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 12, pp. 9795-9800, Dec. 2018.
- [11] T. Binkowski, "Fuzzy logic grid synchronization technique for single-phase systems," in *Proc. Progress in Applied Electrical Engineering*, 5 pp., Koscielisko, Poland, 18-22 Jun. 2018.
- [12] S. Golestan, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, A. M. Abusorrah, and Y. Al-Turki, "All-pass-filter-based PLL systems: linear modeling,