

افزایش سطح ولتاژ خروجی در ایور موتور القایی تکفاز به کمک اینورتر منبع امپدانس

علی یزدیان ورجانی
دانشگاه تربیت مدرس
yazdian@modares.ac.ir

مصطفی محمدیان
دانشگاه تربیت مدرس
mohamadian@modares.ac.ir

امیرحسین رجائی
دانشگاه تربیت مدرس
rajaei@modares.ac.ir

چکیده- با توجه به مصارف گسترده و متنوع موتورهای القایی تک فاز در صنعت، کنترل سرعت این نوع موتورهای القایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا توپولوژی‌های مختلفی برای ساخت سیستم کنترل دور آن‌ها مطرح شده است. اما محدودیت اصلی در مورد تمام این توپولوژی‌ها، کاهش سطح ولتاژ خروجی اینورتر نسبت به ولتاژ ورودی آن و در نتیجه محدود بودن ولتاژ اعمالی به سیم پیچ‌های اصلی و کمکی موتور القایی تکفاز می‌باشد. در این مقاله با بهره‌گیری از نوع جدیدی از اینورترهای سه فاز (اینورتر منبع امپدانس) که قابلیت افزایش (بوست) سطح ولتاژ خروجی را دارند این محدودیت جبران شده است. روابط لازم برای استفاده از اینورتر منبع امپدانس در کنترل سرعت موتور القایی تکفاز و روش مدولاسیون و کنترل سوئیچینگ اینورتر، به طور کامل شرح داده شده است. شبیه‌سازی برای دو حالت استفاده از اینورتر سه فاز متعارف و استفاده از اینورتر منبع امپدانس انجام گرفته و نتایج آن بیان شده است. این نتایج بهبود عملکرد موتور القایی تکفاز را در حضور اینورتر منبع امپدانس نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: موتور القایی تکفاز، کنترل دور موتور، اینورتر منبع امپدانس

۱- مقدمه

موتورهای القایی تکفاز یکی از پر کاربردترین انواع موتورهای ac در توانهای کم هستند و بطور گسترده در کاربردهای خانگی یا تجاری که منبع برق سه فاز در دسترس نمی‌باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعنوان نمونه برخی کاربردهای موتور تکفاز عبارتند از: پمپ، تجهیزات تهویه هوا، ماشین لباسشویی و غیره.

در اکثر موارد این موتورها بصورت یک موتور دو فاز با دو سیم پیچ اصلی و کمکی به کار برده می‌شوند که یک خازن با سیم پیچ کمکی سری شده است. کارکرد آنها نیز در یک، دو و یا حداکثر سه سرعت (که بطور دستی انتخاب می‌شود) امکان پذیر می‌باشد. واضح است که در چنین شرایطی در طراحی سیستم اصلی محدودیت وجود دارد و قابلیت‌های آن به شدت کاهش می‌یابد. در صورتی که امکان تغییر سرعت موتور در محدوده وسیعی وجود داشته باشد، قابلیت‌های بسیاری را می‌توان به این سیستم‌ها افزود.

در دهه اخیر استفاده از اینورتر به منظور تغذیه موتور القایی تکفاز با توجه به مزایای آن بسیار مورد توجه واقع شده است [1-2]. در مورد روش‌های کنترل سوئیچینگ اینورتر نیز لازم به ذکر است، از آنجا که ساده ترین و ارزان‌ترین روش کنترل، روش ولتاژ به فرکانس ثابت ($V/f = const$) است، در

عمل در میان روشهای کنترلی این روش بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (مهمترین دلیل انتخاب این روش ارزان بودن آن می‌باشد که با توجه به نوع کاربرد موتورهای القایی تکفاز در مصارف ارزان قیمت توجیه پذیر می‌باشد). لازم به ذکر است که به علت هزینه زیاد سنسورها و در نتیجه افزایش قابل ملاحظه هزینه درایو نسبت به موتور، اکثر توپولوژی‌های ارائه شده در مقالات مختلف بصورت حلقه باز کنترل می‌شوند. اگر چه مقالات مختلف روشهای پیچیده تری را نیز مطرح نموده اند [3].

مهمترین اهداف استفاده از سیستم کنترل دور در موتورهای تکفاز عبارتند از:

- کاهش یا از بین بردن ضربانهای گشتاور
- افزایش کارایی
- افزایش ضریب توان
- امکان کارکرد موتور در سرعت‌های مختلف

در مورد به کارگیری اینورتر و به طور کلی سوئیچ‌های الکترونیکی در کنترل سرعت موتورهای القایی تکفاز توپولوژی‌های مختلفی ارائه شده است [2]، [4-5]. مهمترین این توپولوژی‌ها عبارتند از: چاپر ac/ac تکفاز¹ [2]، سیکلوانورتر

¹ single phase ac/ac chopper

$$\begin{cases} V_a = \frac{V_{dc}}{2} \cos(\omega t) + \frac{V_{dc}}{2} \\ V_b = \frac{V_{dc}}{2} \\ V_c = -\frac{V_{dc}}{2} \sin(\omega t) + \frac{V_{dc}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

که ساق **b**، به سرهای مشترک دو سیم پیچ اصلی و کمکی موتور و ساق های **a** و **c** به ترتیب به سرهای دیگر دو سیم پیچ اصلی و کمکی متصل می شوند شکل (۱).

بنابراین ولتاژ سیم پیچ اصلی موتور برابر خواهد بود با:

$$V_{ab} = V_a - V_b = \frac{V_{dc}}{2} \cos(\omega t) \quad (2)$$

همچنین ولتاژ سیم پیچ کمکی موتور نیز برابر خواهد بود با:

$$V_{cb} = V_c - V_b = -\frac{V_{dc}}{2} \sin(\omega t) \quad (3)$$

در [5] روشی برای افزایش سطح ولتاژ خروجی اینورتر پیشنهاد شده است (تکنیک common mode) که پیک ولتاژ سینوسی خروجی اینورتر را حداکثر تا ۷۰٪ ولتاژ dc ورودی افزایش می دهد (شکل ۴). در صورت استفاده از تکنیک common mode (که می توان آن را معادل تکنیک تزریق هارمونیک سوم^۵ در سیستم سه فاز به حساب آورد) در کنترل سوئیچ های اینورترهای متعارف سطوح ولتاژ مانند شکل ۴ خواهد بود.

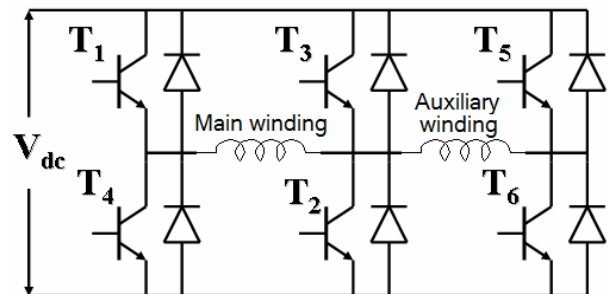
روش های جدیدتر مانند روش بردار فضایی^۶ [7] نیز حداکثر می توانند موج سینوسی با دامنه ۷۰٪ ولتاژ dc ورودی در دو سر سیم پیچ ها ایجاد کنند.

بطور خلاصه یکی از محدودیت های اصلی استفاده از اینورتر برای کنترل دور موتور القایی تک فاز، کاهش سطح ولتاژ خروجی اینورتر می باشد.

۳- مبدل منبع امپدانس^۷

با توجه به محدودیت های موجود در مورد اینورترهای متعارف، در سال ۲۰۰۳ نوع جدیدی از اینورترها معرفی گردید [8] که علاوه بر رفع بسیاری از مشکلات و محدودیت های اینورترهای متعارف، قابلیت افزایش (بوست) ولتاژ ورودی را نیز دارا می باشند. این نوع جدید اینورترها را اینورتر منبع امپدانس می نامند (شکل ۲).

ac/ac تک فاز^۱ [4]، اینورتر PWM تمام پل تک فاز^۲ [2]، اینورتر PWM تمام پل دو فاز^۳ [2]، اینورتر منبع ولتاژ سه فاز [5] و غیره. با توجه به تعداد زیاد توپولوژی های موجود و کارایی و نحوه عملکرد آنها، مقایسه بین توپولوژی های مختلف [6] نشان می دهد که اگرچه استفاده از اینورتر سه فاز برای کنترل سرعت موتور القایی تک فاز شکل (۱)، هزینه بیشتری را نسبت به بسیاری از انواع توپولوژی های دیگر طلب می کند، اما به دلیل توانایی در تولید دو ولتاژ کاملاً عمود بر هم در دو سر سیم پیچ های اصلی و کمکی و کارایی بهتر آن می توان این توپولوژی را به عنوان بهترین گزینه جهت کنترل سرعت موتورهای القایی تک فاز در نظر گرفت.



شکل ۱- اتصال دو سیم پیچ موتور تک فاز اینورتر سه فاز

۲- محدودیت سطح ولتاژ خروجی اینورترهای متعارف

محدودیت اساسی توپولوژی های موجود از جمله استفاده از اینورتر سه فاز در کنترل سرعت موتور القایی تک فاز کاهش سطح ولتاژ خروجی نسبت به ولتاژ dc ورودی است. در واقع اگر بر روی موتور القایی تک فاز سیستم کنترل دور موتور (به کمک اینورترهای متعارف) نصب شود، ولتاژ نامی موتور را نمی توان در دو سر سیم پیچ های موتور اعمال کرد بنابراین گشتاور تولیدی موتور کاهش یافته و در نتیجه تمام ظرفیت موتور در دسترس نمی باشد. به عنوان مثال در هنگام استفاده از روش ساده مدولاسیون عرض پالس سینوسی^۴ (SPWM) سطح ولتاژ خروجی $\frac{1}{2}$ ولتاژ dc ورودی خواهد بود (شکل ۳).

ولتاژهای مرجع در هنگام بکارگیری روش مدولاسیون عرض پالس سینوسی برای کنترل اینورتر به قرار زیر می باشد.

¹ One phase ac/ac cycloconverter

² Single phase full bridge pwm inverter

³ Two phase full bridge pwm inverter

⁴ Sinusoidal pulse width modulation

⁵ Third harmonic injection

⁶ Space vector modulation

⁷ Z_source converter

۴- کنترل دور موتور القایی تک فاز به کمک اینورتر

منبع امپدانس

در این مقاله به منظور رساندن سطح ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ‌ها به سطح ولتاژ ورودی از اینورتر منبع امپدانس بهره گرفته شده است. به کمک تکنیک common mode، اینورتر می‌تواند ۷٪ ولتاژ ورودی را در خروجی تحویل دهد. بنابراین در سوئیچینگ اینورتر از تکنیک common mode استفاده شده و برای اینکه ولتاژ خروجی از ۷٪ به ۱ پریونیت برسد، از توانایی اینورتر منبع امپدانس در افزایش سطح ولتاژ بهره گرفته شده است. بهره و ضریب بوست به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که سطح ولتاژ خروجی برابر ولتاژ ورودی شود (شکل ۵).

همان طور که در بخش ۲ بیان گردید به کمک تکنیک common mode می‌توان پیک ولتاژ خروجی اینورتر را به ۷٪ ولتاژ dc ورودی رساند. این تکنیک در هنگام استفاده از اینورتر منبع امپدانس نیز قابل اجراست و به کمک آن نیازی به بوست بیش از اندازه ولتاژ dc ورودی به وسیله شبکه امپدانس نیست و در نتیجه استرس ولتاژ بر روی سوئیچ‌های اینورتر کاهش می‌یابد. شکل موج های مرجع مورد استفاده برای سه ساق a,b,c اینورتر سه فاز بدین صورت می‌باشند:

$$\begin{cases} V_a = M \cos(\omega t) + \frac{V_{dc}}{2} + \frac{V_{dc}}{2} \cos(\omega t + \delta) \\ V_b = \frac{V_{dc}}{2} + \frac{V_{dc}}{2} \cos(\omega t + \delta) \\ V_c = -A \sin(\omega t) + \frac{V_{dc}}{2} + \frac{V_{dc}}{2} \cos(\omega t + \delta) \end{cases} \quad (6)$$

با حذف قسمت dc معادلات، روابط آن بدین صورت خواهد بود:

$$\begin{cases} V_a - \frac{V_{dc}}{2} = M \cos(\omega t) + \frac{V_{dc}}{2} \cos(\omega t + \delta) \\ V_c - \frac{V_{dc}}{2} = -A \sin(\omega t) + \frac{V_{dc}}{2} \cos(\omega t + \delta) \end{cases} \quad (7)$$

اگر معادلات (۷) در فضای فازوری نوشته شود روابط آن برابر خواهد بود با:

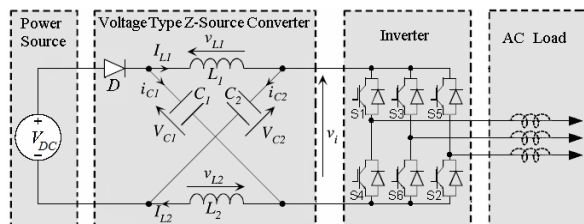
$$\begin{cases} M + \frac{1}{2} \angle \delta \\ jA + \frac{1}{2} \angle \delta \end{cases} \quad (8)$$

شکل (۶) این بردارها را نشان داده است.

با توجه به اینکه ولتاژ ساق حداکثر می‌تواند V_{dc} باشد یعنی:

$$\text{MAX}(V_a) = \text{MAX}(V_b) = 1pu \quad (9)$$

بنابراین اندازه بردارهای فازوری حداکثر برابر ۰.۵ پریونیت خواهد بود یا به عبارتی:



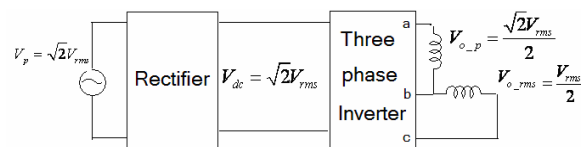
شکل ۲- ساختار کلی مبدل منبع امپدانس

همان طور که در [8] بیان شده است بهره G^1 (نسبت ولتاژ خروجی به ورودی اینورتر منبع امپدانس) و ضریب بوست B^2 (نسبت سطح ولتاژ خروجی به ورودی شبکه امپدانس) برای اینورتر منبع امپدانس به کمک روابط زیر بدست می‌آید.

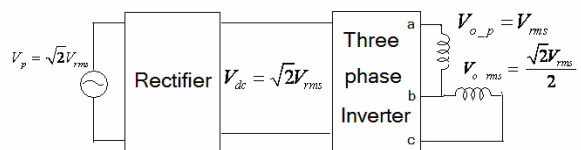
$$G = \frac{V_0}{\frac{V_{dc}}{2}} = MB \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{1 - 2\frac{T_0}{T}} \quad (5)$$

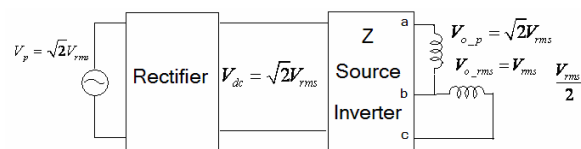
که در آن V_0 پیک ولتاژ فاز خروجی، V_{dc} ولتاژ dc ورودی، M اندیس مدولاسیون^۳ و B ضریب بوست می‌باشد. همچنین فاصله زمانی اعمال بردار اتصال کوتاه^۴ T_0 ، و دوره تناوب سوئیچینگ T می‌باشند.



شکل ۳- سطوح ولتاژ تولیدی در سیستم درایو موتور تکفاز هنگام استفاده از روش مدولاسیون عرض پالس سینوسی



شکل ۴- سطوح ولتاژ قسمت های مختلف درایو موتور القایی تکفاز هنگام استفاده از تکنیک common mode برای کنترل سوئیچ های اینورتر



شکل ۵- سطوح ولتاژ قسمت های مختلف درایو موتور القایی تکفاز در حضور مبدل منبع امپدانس و ولتاژ مؤثر ورودی ۲۲۰ ولت

¹ Gain

² Boost factor

³ Modulation Index

⁴ shout-through vector

۵- شبیه سازی

در این بخش نتایج شبیه سازی های انجام شده بیان شده است. مشخصات موتور مورد استفاده در شبیه سازی در جدول ۱ آورده شده است. مشخصات اینورتر منبع امپدانس و یکسوساز نیز در جدول ۲ بیان شده است. ولتاژ ac ورودی ۱۱۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز و فرکانس موج دندان ارهای ۲ کیلوهرتز می باشد.

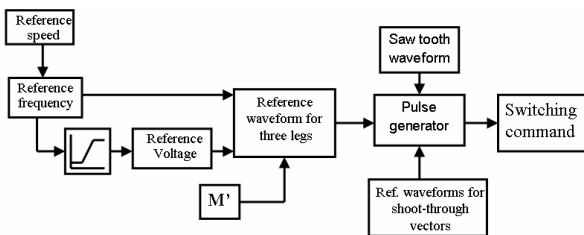
جدول ۱- پارامترهای موتور القایی تکفاز مورد استفاده در شبیه سازی

توان نامی	0.25 hp
ولتاژ نامی	110 v
فرکانس نامی	50 Hz
مقاومت سیم پیچ اصلی استاتور	0.00778 Ω
اندوکتانس سیم پیچ اصلی استاتور	0.0108 H
اندوکتانس تزویج سیم پیچ اصلی	0.2574 H
مقاومت سیم پیچ کمکی استاتور	0.0275 Ω
اندوکتانس سیم پیچ کمکی استاتور	0.0124 H
تعداد قطب	2
نسبت تعداد دور سیم پیچ ها	1

جدول ۲- پارامترهای اینورتر منبع امپدانس

C_1, C_2	10 uF
L_1, L_2	2 mH
خازن یکسوکنده	2 mH

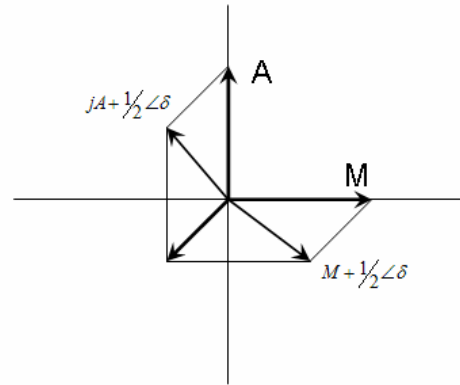
همان طور که بیان شد به دلیل سادگی و کم هزینه بودن از روش کنترل ولتاژ به فرکانس ثابت استفاده شده است. در شکل ۷ بلوک دیاگرام کنترل به کار رفته در این مقاله نشان داده شده است.



شکل ۷- بلوک دیاگرام کنترل سوئیچینگ اینورتر منبع امپدانس با استفاده از قانون ولتاژ به فرکانس ثابت

دو شبیه سازی انجام گرفته است. در شبیه سازی اول موتور القایی تکفاز به کمک یک اینورتر متعارف (در حالت آزاد و بدون گشتاور بار) راه اندازی شده است. (در تولید شکل موج های مرجع برای کنترل سوئیچینگ اینورتر از تکنیک common mode بهره گرفته شده است، در نتیجه ولتاژ مؤثر در دو سر سیم پیچ ها حداکثر $\sqrt{2}/2 \times 110 = 77.8$ ولت بوده است.) نتایج

$$\text{MAX}\left(V_a - \frac{V_{dc}}{2}\right) = \text{MAX}\left(V_c - \frac{V_{dc}}{2}\right) = 0.5 p u \quad (10)$$



شکل ۶- بردارهای فازوری مرجع در هنگام استفاده از تکنیک common mode برای کنترل سوئیچ های اینورتر

بنابراین با تنظیم زاویه δ می توان مقدار A و M را تغییر داد با توجه به اندازه بردار فازوری، مقدار A و M بدین صورت محاسبه می شود.

$$\begin{cases} M_{\max} = \cos \delta \\ A_{\max} = \sin \delta \end{cases} \quad (11)$$

در صورتی که $\delta = 45^\circ$ باشد مقدار A و M با هم برابر بوده و در نتیجه مقدار آنها برابر خواهد بود با :

$$M_{\max} = A_{\max} = \sqrt{2}/2 \quad (12)$$

همان طور که بیان شد به منظور رساندن سطح ولتاژ خروجی به سطح ولتاژ ورودی غیر از استفاده از تکنیک common mode از قابلیت بوست ولتاژ در اینورتر منبع امپدانس نیز بایستی استفاده کرد به گونه ای که بهره اینورتر برابر یک شود، بنابراین روابط زیر بایستی برقرار باشند :

$$\begin{cases} G = B \times \sqrt{2}/2 \quad M = 1 \\ B = \frac{1}{2M - 1} \end{cases} \quad (13)$$

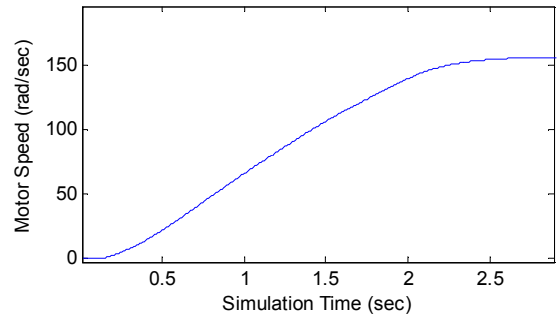
در نتیجه به کمک معادله (۱۳) اندیس مدولاسیون M بدین صورت محاسبه می شود.

$$\frac{1}{2M - 1} \times \sqrt{2}/2 \quad M = 1 \quad (14)$$

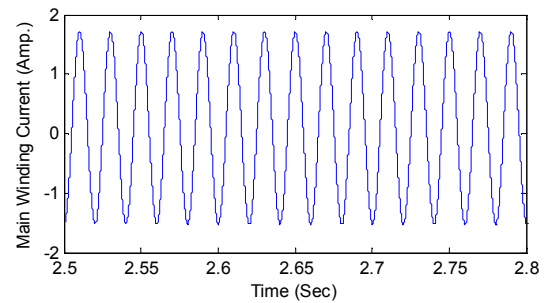
اندیس مدولاسیون M برابر خواهد بود با: $M = \frac{2}{4 - \sqrt{2}} \approx 0.77$ به کمک اندیس مدولاسیون و رابطه

$$(15) \quad B = 1.83 \text{ بدست می آید}$$

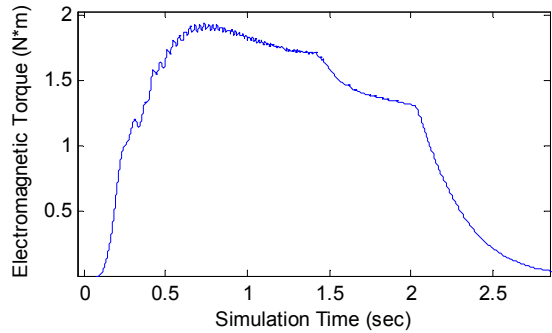
شبییه سازی به ازای اندیس مدولاسیون یک و فرکانس نامی در شکل (۸) آورده شده است.



الف

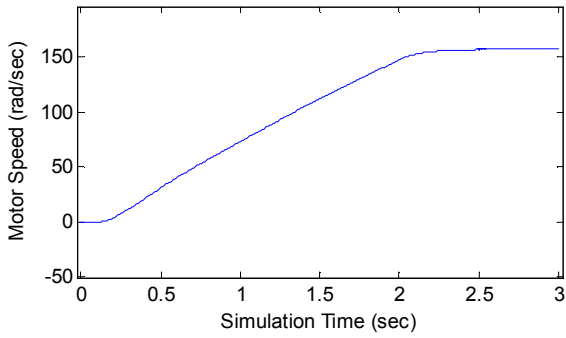


ب

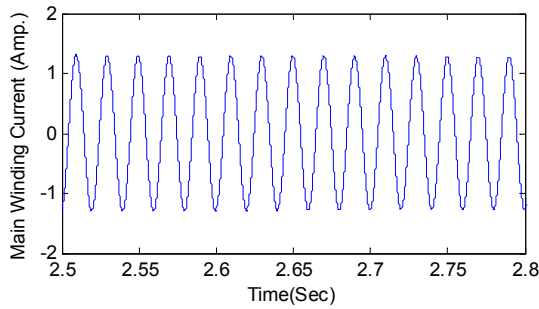


پ

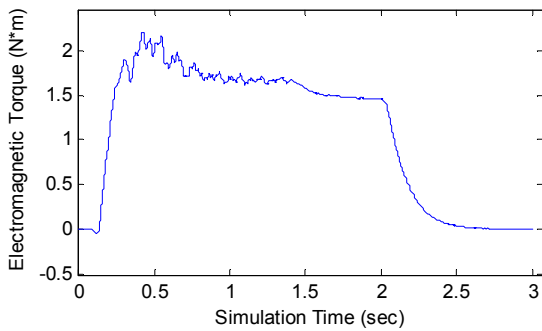
شکل ۸- نتایج شبیه سازی کنترل دور موتور القایی تکفاز به کمک اینورتر متعارف سه فاز الف) سرعت موتور ب) جریان سیم پیچ اصلی موتور پ) گشتاور تولیدی موتور



الف



ب



پ

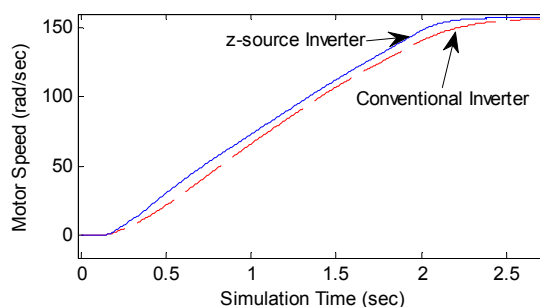
شکل ۹- نتایج شبیه سازی کنترل دور موتور القایی تکفاز به کمک اینورتر منبع امپدانس الف) سرعت موتور ب) جریان سیم پیچ اصلی موتور پ) گشتاور تولیدی موتور

در شکل (۹) نشان داده شده است. سرعت های موتور در دو حالت شبیه سازی شده (استفاده از اینورتر متعارف و اینورتر منبع امپدانس) با یکدیگر مقایسه شده اند. مشخص است که در هنگام استفاده از اینورتر منبع امپدانس موتور سریع تر به سرعت نهایی خود رسیده است.

در شبیه سازی دوم ، موتور القایی تکفاز به کمک اینورتر منبع امپدانس راه اندازی شده است. همان طور که در قسمت ۴ نشان داده شد می توان به کمک اینورتر منبع امپدانس مشکل افت ولتاژ دو سر سیم پیچ های اصلی و کمکی را رفع نمود. در نتیجه ولتاژ مؤثر دو سر سیم پیچ های اصلی و کمکی حداکثر ۱۱۰ ولت می باشد. نتایج حاصل از شبیه سازی به ازای اندیس مدولاسیون $M=0.773$ ، ضریب بوست $B=1.83$ و فرکانس نامی در شکل (۹) آورده شده است.

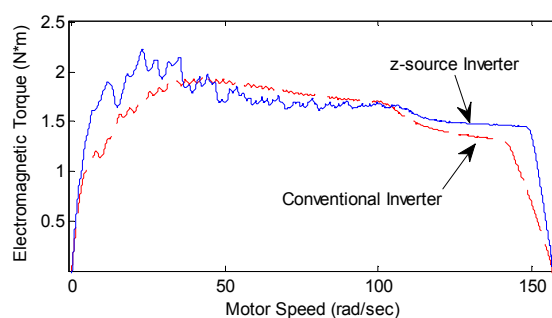
مراجع

- [1] E.r.Collins, "Torque and Slip Behaviour of Single-phase Induction Motors Driven from Variable Speed Supplies", Jr. IEEE IAS-90, Seattle, pp61-66, 1990
- [2] Ali S. Ba-thunya, Rahul Khopkar, Kexin Wei, Hamid A. Toliyat, "Single Phase Induction Motor Drives-A Literature Survey" , IEEE, pp911-916,2001.
- [3] Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa, , Cursino Brandão Jacobina, Edison Roberto Cabral da Silva, and Antonio Marcus Nogueira Lima, "Vector Control Strategies for Single-Phase Induction Motor Drive Systems", IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 51, NO. 5, OCT 2004.
- [4] A. Khoei and S. Yuvarajan, "Steady State Performance of a Single Phase Induction Motor Fed by a Direct ac-ac Converter," Proceedings of IEEE Conference, 1989, pp. 128- 132
- [5] D.G. Holmes, A.Kotsopoulos, "Variable speed control of single and two phase induction motors using a three phase voltage source inverter", Proc. Of Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 613 -620, vol. 1, 1993
- [6] F. Lungeanu, K. Skaug, A. Aupke, "Comparison of Variable Speed Drives for Single-phase Induction Motors , Frede Blaabjerg, IEEE, PCC-Osaka, pp1328-1333, 2002
- [7] M. A. Jabbar, Ashwin M. Khambadkone, and Zhang Yanfeng, "Space-Vector Modulation in a Two-Phase Induction Motor Drive for Constant-Power Operation", IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 51, NO. 5,pp 1081-1088, OCTOBER 2004.
- [8] F. Z. Peng, "Z-source inverter," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 39, no. 2, pp. 504-510, Mar./Apr. 2003.



شکل ۹- مقایسه تغییرات سرعت موتور در هنگام استفاده از اینورتر متعارف و اینورتر منبع امپدانس

شکل (۱۰) مشخصه گشتاور سرعت موتور را در دو مورد با یکدیگر مقایسه می کند. واضح است که در هنگام استفاده از اینورتر متعارف امپدانس اندازه گشتاور بیشتر می باشد.



شکل ۱۰- مشخصه گشتاور سرعت موتور القایی تکفاز در هنگام راه اندازی در دو حالت استفاده از اینورتر متعارف و اینورتر منبع امپدانس

۶- نتیجه گیری

علیرغم همه مزیت‌هایی که استفاده از اینورترهای متعارف در کنترل سرعت موتورهای القایی تکفاز دارند، محدودیت آن‌ها در مورد سطح ولتاژ خروجی و کاهش آن حداقل به میزان ۷۰٪ ولتاژ ورودی موجب می‌شود هنگام استفاده از اینورترهای متعارف، گشتاور خروجی موتور محدود بوده و تمام ظرفیت موتور در دسترس نباشد. در این مقاله به کمک استفاده از نوع جدیدی از اینورترها (اینورتر منبع امپدانس) که قابلیت افزایش سطح ولتاژ خروجی را دارد، محدودیت سطح ولتاژ خروجی اینورتر برطرف شده است. نتایج شبیه‌سازی بهبود عملکرد موتور و افزایش گشتاور خروجی و سرعت پاسخ بهتر موتور را هنگام استفاده از اینورتر منبع امپدانس اثبات می‌کند.