

دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

اعمال ولتاژ سینوسی حاصل از مبدل های MPI به یک موتور القایی سه
فاز و بررسی اثر THD در موتور

مهدی میرزائی^۱، بیژن غلامی^۲

^۱دکتری برق، مربی فنی و حرفه ای مرکز هوراند، اداره فنی و حرفه ای استان آذربایجان شرقی، هوراند، ایران

mirzaeymehdi@yahoo.com

^۲ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mashrot_65@yahoo.com

چکیده

امروزه استفاده از راه اندازها و کنترلر های الکترونیکی جز لاینفکی از ساختار موتورهای الکتریکی شده است که با توجه به شرایط اعمال شده ولتاژ ورودی موتورهای الکتریکی می تواند در مواردی با THD همراه باشد. یکی از مبدل های DC به AC که امروزه کاربرد وسیعی دارد استفاده از مبدل های چند سطحی MPI می باشد که برای تولید یک ولتاژ سینوسی مورد نظر است. یکی از روش های ساخت این مبدل ها روش VSI است که در کاهش دادن هارمونیک ها بسیار موثر است. در این تحقیق با به کارگیری یک موتور القایی سه فاز و اعمال ولتاژ سینوسی حاصل از روش مبدل های چند سطحی VSI به آن به بررسی اثر THD بر حالت های کاری موتور پرداخته شده است. از روی معادلات مربوط به حالت های پایداری و دینامیکی ماشین مشخصه های رفتاری سیستم موتور استخراج می شود. در پایان دیده می شود که به دلیل شیوه ساخت مبدل سرعت و گشتاور ماشین همواره به صورت نوسانی می باشد که برای سیستم مضر است.

کلمات کلیدی

مبدل های چند سطحی ، هارمونیک ها ، مبدل های ، موتور های القایی.

Applying the Sinusoidal Voltage Obtained from MPI Converters to a Three-Phase Induction Motor and Investigating the Effect of THD in the Motor

Mehdi Mirzaei

Ph.D of Electrical Engineering, Trainer of Horand Center, Technical and Vocational
Department of East Azarbaijan Province, Horand, Iran

Abstract

Nowadays, the use of electronic sensors and controllers has become an integral part of the structure of electric motors, which can be associated with THD in some cases due to the applied conditions of the input voltage of electric motors. One of the Dc to Ac converters that is widely used today is the use of multi-level MPI converters, which are intended to produce a sinusoidal voltage. One of the methods of making these converters is the VSI method, which is very effective in reducing harmonics. In this research, by using a three-phase induction motor and applying the sinusoidal voltage obtained by the method of multi-level VSI converters, the effect of THD on the working modes of the motor has been investigated. From the equations related to the stability and dynamic states of the machine, the behavioral characteristics of the engine system are extracted. In the end, it can be seen that due to the construction method of the speed and torque converter, the car always fluctuates, which is harmful to the system.

key words

Multilevel converters, harmonics, converters, induction motors.

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

۱. مقدمه

تولید شکل موج سینوسی پیوسته نسبت به زمان وظیفه اصلی اینورتر است. با این وجود استفاده از کلیدهای قدرت در اینورترهای استاتیکی ترکیبی از مقدارهایی ناپیوسته در شکل موج خروجی بدست می دهند [۱]. مبدل های چند سطحی توانایی غلبه بر محدودیت ولتاژ حاصل از اینورتر با کلیدهای نیمه هادی را دارند و نیز قابلیت تولید ولتاژ بالاتر با مشخصات هارمونیک بهتری را دارا می باشند. علاوه بر این اینورترهای چند سطحی می توانند در فرکانس های بالا نیز با استفاده از مدلاسیون پهنای باند، به خوبی عمل کنند [۲]-[۳]. بنابراین برای کاربردهای با ولتاژ و توان بالا، اینورترهای چند سطحی برای دستیابی به شکل موج خروجی مطلوب، بر اینورترهای دو سطحی کلاسیک ترجیح داده می شوند [۱]. یک روش برای اینورتر چند سطحی می تواند به گونه ای باشد که تمام سطوح افزایشی و کاهش DC با هم ترکیب شوند. علاوه بر آن با توجه به انتخاب اختیاری تعداد سطوح ولتاژ می تواند شکل موج خروجی دلخواهی، به شکل سینوسی بدست آورد [۴]. مساله تاثیر هارمونیک ها که از طریق اینورترها به سیستم قدرت وارد شده و موجب تلفات قابل ملاحظه ای می گردد، با توسعه ی علم الکترونیک قدرت بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته و نحوه ی عملکرد این سیستم ها با چنین منابعی مورد بررسی قرار می گیرند. [۵] سرعت، جریان و حرارت مهم ترین عواملی هستند که در یک موتور القایی توسط هارمونیک ها تحت تاثیر قرار می گیرند. حضور مبدل های چند سطحی در تغذیه ی موتورهای القایی و کاهش THD های حاصل از اینورتر به روش های گوناگونی مورد ارزیابی قرار گرفته اند. [۵]-[۶]

در این تحقیق با شبیه سازی اینورتر منبع ولتاژی چند سطحی (VSI) به ایجاد سطح های گوناگون پرداخته شده است. تعداد سطوح شکل موج خروجی به مقدار بالایی جهت سینوسی شدن رسانده شده است. در این تحقیق موتور سه فاز با معادلات دینامیکی مدل شده است [۷].

۲. شرح سیستم

۲.۱. ساختار مبدل

امروزه یکی از مبدل های Dc به Ac، استفاده از روش Multi-level Invert می باشد که برای تولید یک ولتاژ سینوسی مورد نظر است. از مزایای مهم این روش کاهش THD و کاهش استرس کلیدهای سوئیچینگ است. یکی از روشهای MLI روش VSI است که در کاهش دادن هارمونیک ها و افزایش سرعت رسیدن به ولتاژ سینوسی مطلوب موثر است. در این تحقیق روش جدیدی ارائه می شود که با توجه به تعدادی منبع Dc و الگوریتم سوئیچ زنی کلیدها، به ولتاژ و فرکانسی مطلوب نائل می آید. در این روش Carrier ها، سطح ولتاژهای ثابتی هستند که براساس ولتاژ پایه انتخاب می شوند. در صورتی که ولتاژ پایه، پایین ترین سطح ولتاژ Dc به کار رفته باشد که آن را α بنامیم، مقادیر Carrier ها به صورت زیر خواهند بود:

$$\dots, -4\alpha, -3\alpha, -2\alpha, -\alpha, 0, \alpha, 2\alpha, 3\alpha, 4\alpha, \dots$$

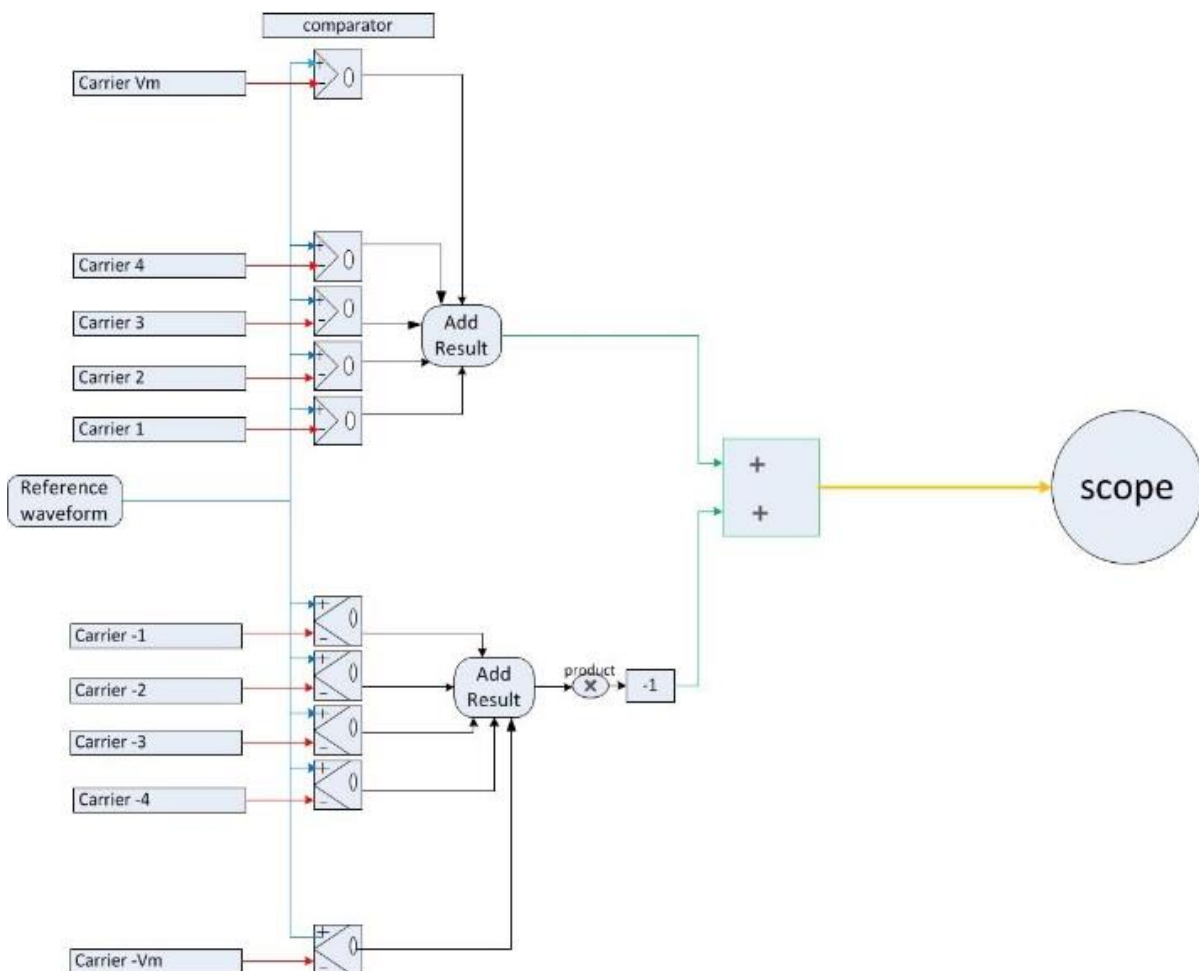
مقدار ماکزیمم ولتاژ سینوسی reference، یک واحد بیشتر از ماکزیمم ولتاژ مثبت تولیدی Carrier و یک واحد کمتر از

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

مینیمم ولتاژ منفی تولیدی Carrier انتخاب می شود. سپس یک مقایسه بین Carrier و reference انجام می گیرد. در مقادیر منفی و مثبت ولتاژ، این مقایسه متفاوت است. در مقادیر مثبت Carrier و Reference، در صورتی که مقدار $1+$ در خروجی ظاهر می شود و در مقادیر منفی در صورتی که مقدار $1-$ در خروجی ظاهر می شود. اکنون مقدار مقایسه در این قسمت، در $1-$ ضرب می شود. باید توجه داشت که مجموع این مقایسه ها در هر بازه، با هم جمع و به خروجی برده می شود. ساختار یک مبدل ۹ سطحی در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۲ نشان داده شده است که شکل موج حاصل از این مبدل چگونه به دست می آید. در این شکل مقایسه مقادیر Carrier ها با یک ولتاژ سینوسی به عنوان reference مشهود است. برای ایجاد یک منبع سه فاز جهت اعمال به یک موتور القایی می توان به شیوه بالا عمل کرده و یک منبع سه فاز با اختلاف 120° درجه به وجود آورد.

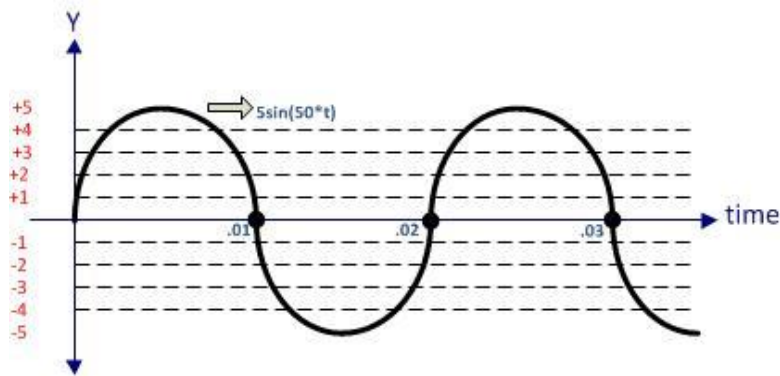


شکل ۱: ساختار یک مبدل چند سطحی

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir



شکل ۲: مقایسه مقادیر Carrier ها با یک ولتاژ سینوسی به عنوان reference

در ادامه مقایسه ای بین مبدل های چند سطحی مختلف در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول ضمن تعیین نسبت هارمونیک های مختلف به هارمونیک اصلی مقدار THD هر کدام از این مبدل ها نشان داده شده است.

جدول ۱: مقایسه مبدل های چند سطحی مختلف حاصل از روش VSI

| Inverter | (h3/h1) | (h5/h1) | (h7/h1) | THD(%) |
|----------|---------|---------|---------|--------|
| Level 9 | ۰,۰۲۳ | ۰,۰۶۵۱ | ۰,۰۰۳۹ | ۱۰,۵ |
| Level 27 | ۰,۰۰۴۵ | ۰,۰۱۵۶ | ۰,۰۰۰۲ | ۳,۶ |
| Level 81 | ۰,۰۰۴ | ۰,۰۰۴۵ | ۰,۰۰۰۷ | ۱,۲ |

۳. مدل سازی موتور سه فاز

با توجه به معادلات ذکر شده در مرجع [۶] مدار های معادل d و q یک موتور القایی سه فاز در قاب مرجع ساکن استاتور در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل همه پارامترها به سمت استاتور ارجاع داده شده اند و اندیس های S و r به ترتیب به مقادیر استاتور و رتور اشاره دارد. برای تبدیل پارامترهای ماشین به قاب مرجع ساکن از تبدیل پارک استفاده شده است. معادله (۱) این تبدیل را نشان می دهد.

$$f_{qdos} = K_s f_{abcs} \quad (1)$$

$$(f_{qdos})^T = [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s}] \quad (2)$$

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (3)$$

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

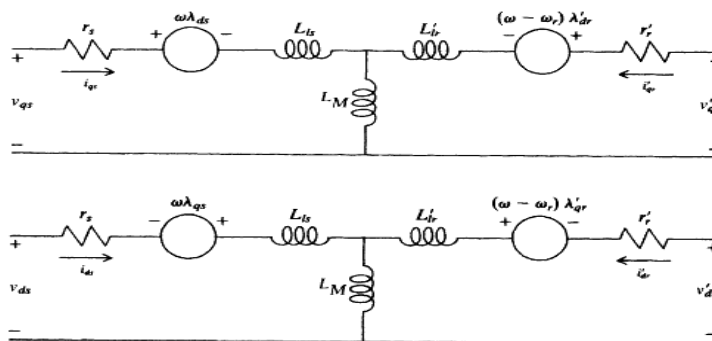
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

در معادلات (۱) تا (۳) متغیر f می تواند هر کدام از متغیرهای ولتاژ یا جریان مربوط به ماشین باشد. ضریب K_s ماتریس انتقال از قاب متغیرهای ماشین به قاب ساکن می باشد. این ماتریس در معادله (۴) آمده است:

$$K_s = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در شکل ۳ منظور از R_s و R_r به ترتیب مقاومت های سیم پیچی رتور و استاتور و X_Ls و X_Lr راکتانس های آنها می باشند. X_m راکتانس مغناطیس کنندگی و ω_b و ω_r مربوط سرعت زاویه ای رتور و سرعت مبنا می باشند.



شکل ۳: مدار معادل موتور بر روی محور q و d

با توجه به شکل ۳ معادلات مربوط به ولتاژ استاتور در قاب مرجع به صورت معادلات (۵) و (۶) نوشته می شود:

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} (\psi_{qs}) \quad (5)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} (\psi_{ds}) \quad (6)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} (\psi'_{qr}) \quad (7)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} (\psi'_{dr}) \quad (8)$$

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

همچنین معادلات مربوط به شارژ نشتی ماشین در واحد pu به صورت معادلات (۹) تا (۱۲) بیان می شوند:

$$\psi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (9)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (10)$$

$$\psi'_{qr} = X'_{lr} i'_{qr} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (11)$$

$$\psi'_{dr} = X'_{lr} i'_{dr} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (12)$$

در اینجا به دلیل متعادل در نظر گرفتن سیستم موتور از نوشتن معادلات حالت O قاب مرجع صرف نظر شده است. معادله گشتاور ماشین در قاب مرجع ساکن نیز در معادله (۱۳) آمده است:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{X_M}{D\omega_b}\right) (\psi_{qs} \dot{\psi}'_{dr} - \psi_{qr} \dot{\psi}'_{ds}) \quad (13)$$

۴. شبیه سازی و نتایج

پس از ایجاد اینورتر VSI و پیاده سازی معادلات دینامیکی سیستم در سیمولینک متلب خروجی سه فاز اینورتر به ورودی معادلات دینامیکی موتور اعمال می شود. مشخصات موتوری که در این تحقیق پیاده سازی شده است در جدول ۲ آمده است. شبیه سازی در مبدل های مختلف ۹ و ۸۱ سطحی اجرا شده است. در هر حالت نتایج با حالتی که ورودی موتور سینوسی کامل است مقایسه شده است. در شکل های ۴ و ۵ خروجی مبدل در سطح های مختلف با شکل موج سینوسی نشان داده شده اند. دیده می شود که هر چه تعداد سطح های مبدل بیشتر باشد شکل موج آن بیشتر به حالت سینوسی شبیه است. با اعمال این ولتاژها به موتور معرفی شده در جدول ۲ مقایسه هایی بین مشخصه های موتور با حالت سینوسی انجام شده است. در شکل های ۸-۶ مشخصه گشتاور موتور در حالت های مختلف نشان داده شده است. انتظار می رود که موتور پس از مدتی به یک گشتاور ثابت دست یابد اما همراه بودن ولتاژ اعمالی به موتور با THD سبب می شود که گشتاور همواره دارای مقداری نوسانی باشد که برای موتور مضر است.

جدول ۲: مشخصات ماشین سه فاز مدل شده [۶]

| | | | |
|---------|-----|---------|--------|
| Sn (w) | ۷۵۰ | Rr (Ω) | ۱,۹۹ |
| V (v) | ۲۲۰ | Xm (Ω) | ۰,۰۰۱۶ |
| F (Hz) | ۵۰ | XLr (Ω) | ۰,۰۰۶ |
| poles | ۴ | XLs (Ω) | ۰,۰۰۶ |
| Cos (φ) | ۰,۸ | Rs (Ω) | ۳,۳۵ |

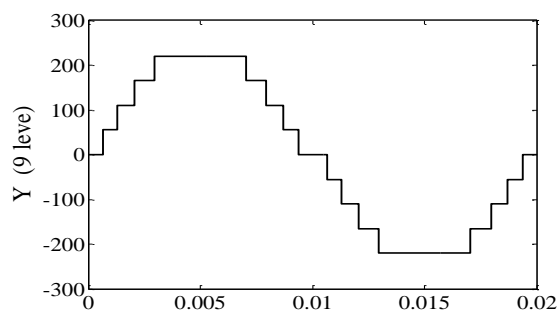
در شکل های ۹-۱۱ نیز مشخصه سرعت موتور با توجه به ولتاژ اعمالی به آن آورده شده است. موتوری که با دور ثابت و

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

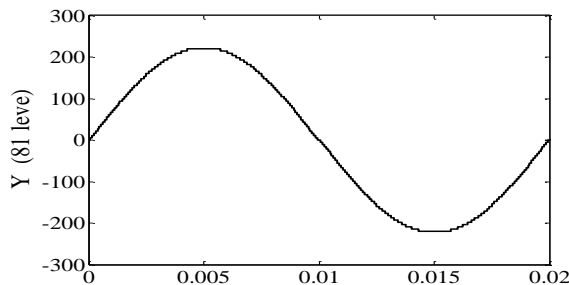
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

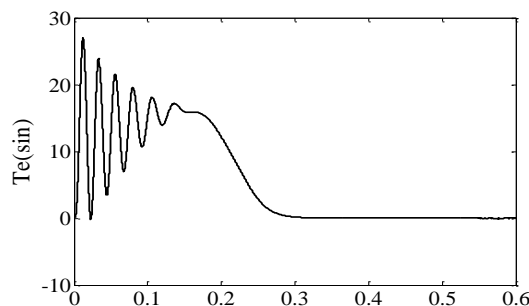
معینی به چرخش درنیاید قطعا کارایی ندارد. در شکل های ۱۲ و ۱۳ جریان رتور روی محور q در قاب مرجع ساکن برای حالات مختلف نشان داده شده است. همانطور که در شکل های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می شود در صورت اعمال هر کدام از ولتاژ های چند سطحی جریان روی محور q به صورت نوسانی در آمده و دارای خطای ماندگار می باشد. همراه شدن ولتاژ اعمالی به موتور با THD حاصل از روش VSI سبب نوسانی شدن سرعت موتور گشته که به نوبه خود به شدت موتور را مورد آسیب قرار می دهد.



شکل ۴: موج یک مبدل ۹ سطحی با دامنه ۲۲۰ و فرکانس ۵۰



شکل ۵: موج یک مبدل ۸۱ سطحی با دامنه ۲۲۰ و فرکانس ۵۰

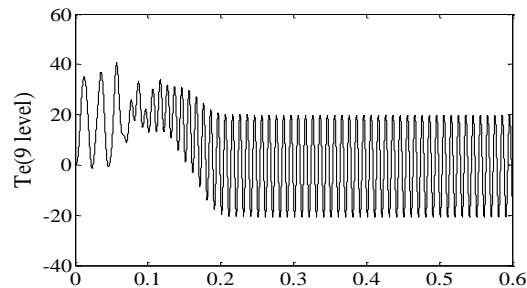


شکل ۶: منحنی گشتاور نسبت به زمان موتور در حالت ورودی سینوسی

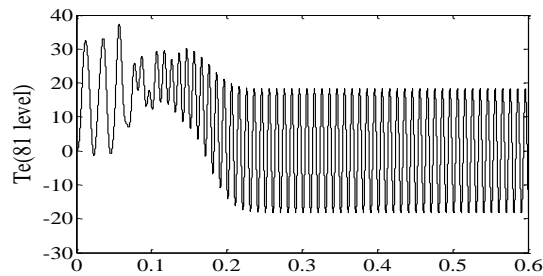
دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

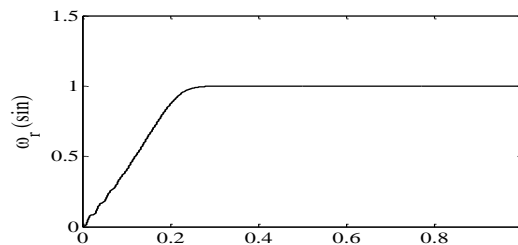
senacnf.ir



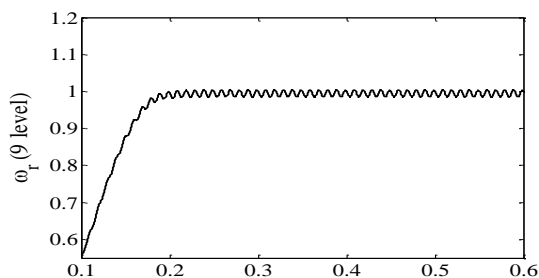
شکل ۷: منحنی گشتاور موتور با ورودی ۹ سطحی



شکل ۸: منحنی گشتاور موتور با ورودی ۸۱ سطحی



شکل ۹: منحنی سرعت رتور بر حسب پر یونیت با ورودی سینوسی

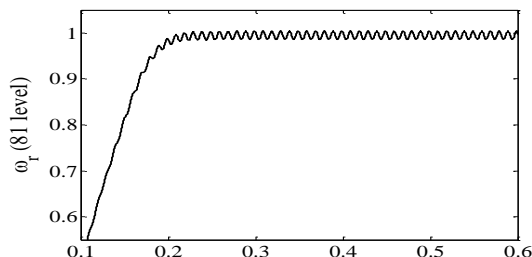


شکل ۱۰: منحنی سرعت رتور با ورودی ۹ سطحی

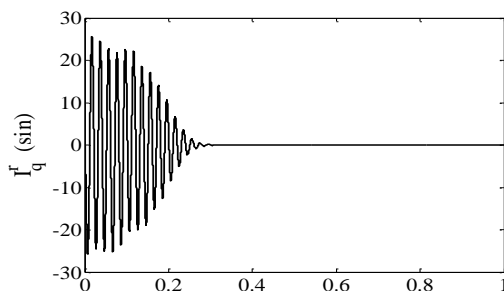
دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

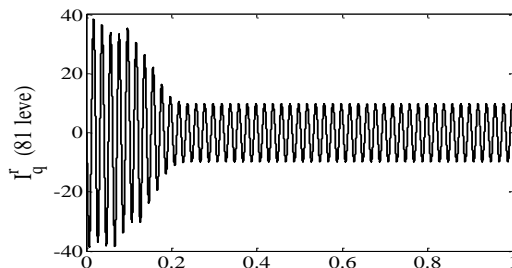
senacnf.ir



شکل ۱۱: منحنی سرعت رتور با ورودی ۸۱ سطحی



شکل ۱۲: منحنی جریان رتور بر روی محور q با ورودی سینوسی



شکل ۱۳: منحنی جریان رتور بر روی محور q برای ورودی ۸۱ سطحی

۵. نتیجه گیری

به رغم آنکه روش VSI روش مفید برای تولید ولتاژ سینوسی می باشد، اما نمی توان از این ولتاژ برای کارکرد دائم موتور استفاده کرد. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شد در این روش مبدل های با تعداد سطح بالا با درصد خیلی کمی از THD همراه است (مثلا ۱،۲٪ برای مبدل ۸۱ سطحی). با این وجود، نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهند در صورت اعمال ولتاژ حاصل از این روش علیرغم درصد کم THD مشخصه های ماشین مقداری نامطلوب خواهند داشت. نتایج نشان می دهند که گشتاور و سرعت ماشین همراه با نوسان بوده که در نتیجه آن به مرور ایام، ضربه هایی به شفت موتور وارد گشته

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

و در پی آن از کارکرد اصلی خود خارج می شود. و نیز دیده می شود که در محور q جریان حالت ماندگار صفر نمی شود که این به علت عدم تقارن در معادلات پارک است. در این تحقیق ثابت گشت که روش VSI با وجود آنکه روشی نو برای تبدیل DC به AC می باشد و با کاهش دادن هارمونیک ها و افزایش سرعت رسیدن به ولتاژ سینوسی مطلوب بسیار موثر است اما به دلیل شیوه ساخت این مبدل اعمال ولتاژ حاصل از این روش به موتورهای القایی مفید واقع نخواهد بود و نتایج زیان باری را نیز در پی خواهد داشت.

۶. منابع و مراجع

- [1] Franquelo LG, Rodriguez JL, Leon J, Kouro S, Portillo R, Prats MA. The age of multilevel converters arrives. *IEEE Ind Electron Mag.* 2008;2(2):28–39.
- [2] J. I. Leon, R. Portillo, S. Vazquez, J. J. Padilla, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Simple unified approach to develop a time-domain modulation strategy for single-phase multilevel converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 9, pp. 3239–3248, Sep. 2008.
- [3] Rodriguez J, Lai J-S, Peng FZ. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Trans Ind Electron* 2002;49(4):724–38.
- [4] Krishna Kumar Gupta, Shailendra Jain. A multilevel Voltage Source Inverter (VSI) to maximize the number of levels in output waveform. *Elsevier Electrical Power and Energy Systems* 44 (2013) 25–36.
- [5] Rup Narayan Ray, Debashis Chatterjee. A PSO based optimal switching technique for voltage harmonic reduction of multilevel inverter. *Elsevier Expert Systems with Applications* 37 (2010) 7796–7801.
- [6] Ebrahim Babaei, Seyed Hossein Hosseini. Reduction of THD and low order harmonics with symmetrical output current for single-phase ac/ac matrix converters. *Elsevier Electrical Power and Energy Systems* 32 (2010) 225–235.
- [7] Krause, P. C., "Analysis of Electric Machinery", New York, McGraw-Hill, (1986).
- [8] C. F. Landy, W. Levy, M. McCulloch, and A. S. Meyer, "The effect of deep-bar properties when assessing reswitching transients in squirrel cage induction motor," in *IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting*, 1991, vol. 1, pp. 35–39.
- [9] A. C. Smith, R. C. Healey, and S. Williamson, "A transient induction motor model including saturation and deep bar effect," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 1, pp. 8–15, Mar. 1996.
- [10] B. T. Ooi and T. H. Barton, "Starting transients in induction motors with inertia loads," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-91, pp. 1870–1874, Sep.–Oct. 1972.
- [11] R. Richter, *Elektrische Maschinen*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1924, pp. 268–271.