

مدل سازی و شبیه سازی سیستم موتور سنکرون - سیکلوکنورتور با استفاده از نرم افزار Matlab

صلاح محمدی¹

¹ گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی یزدان پناه، دانشگاه فنی و حرفه ای، سندج، senacnf@gmail.com

چکیده

این مقاله به مدل سازی و شبیه سازی سیستم موتور سنکرون - سیکلوکنورتور می پردازد. در این شبیه سازی مدل سیکلوکنورتور شش پالسه با جریان غیر گردشی¹ و موتور سنکرون قطب برجسته بررسی شده است. مدل کامل موتور سنکرون قطب برجسته همراه با سیم پیچ های میراکننده در نظر گرفته شده است. با این شبیه سازی می توان عملکرد موتور سنکرون قطب برجسته تغذیه شده از طریق سیکلوکنورتور را در حالت ماندگار و گذرا پیش بینی کرد. راه اندازی ماشین سنکرون با استفاده از سیکلوکنورتور به روش کاهش همزمان ولتاژ و فرکانس شبیه سازی شده است. در این مقاله اثرات اندوکتانس منبع و کموتاسیون بین تریستورها روی عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان نتایج شبیه سازی این سیستم در محیط سیمولینک² ارائه شده است.

واژه های کلیدی

سیکلوکنورتور، موتور سنکرون، شبیه سازی، راه اندازی، مدل سازی

¹ Noncirculating - current

² Simulink

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

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

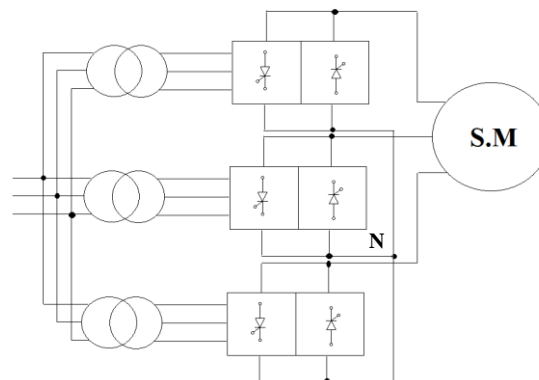
senacnf.ir

1. مقدمه

سیکلونورتر یک مبدل AC به AC است که ولتاژ متناوب را به صورت مستقیم به ولتاژ متناوب با دامنه و فرکانس مطلوب تبدیل می کند. البته سیکلونورتر با کلیدهای تریستوری و کموتاسیون طبیعی معمولاً قادر به تولید فرکانس های کمتر از فرکانس شبکه است و هر چه فرکانس خروجی کمتر باشد کیفیت ولتاژ خروجی بهتر است. موتورهای سنکرون هم دارای مزایای سرعت ثابت، قابلیت کار با ولتاژ بالا، ضریب قدرت قابل تنظیم و راندمان بالا هستند. سیستم موتور سنکرون - سیکلونورتر به طور وسیعی در صنایع قدرت بالا و سرعت پایین نظیر کارخانه های سیمان، معادن، صنایع نورد و غیره مورد استفاده قرار می گیرد [1]. این سیستم برتری هایی بر ماشین های DC و القایی دارد. این سیستم طراحی قدرت بالا اقتصادی دارد. عملکرد در چهار ربع از خواص ذاتی این سیستم است. همچنین چون این سیستم بیشتر در موتورهای سنکرون قطب برجسته سرعت پایین عمل می کند، پایین بودن اینرسی باعث پاسخ سریع آن خواهد شد. مدل سازی و شبیه سازی این سیستم ابتدا در مرجع [2] انجام شده است. این مقاله معادلات موتور سنکرون را در حالت ماندگار بررسی کرده است. مرجع [3] شبیه سازی این سیستم را در حوزه ی زمان بررسی کرده است. منبع [4] شبیه سازی و مدل سازی این سیستم را جهت بررسی تلفات سیم پیچ های میرایی و مؤلفه های هارمونیک انجام داده است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار Matlab در محیط سیمولینک موتور سنکرون قطب برجسته و سیکلونورتر شش پالسه در مد کنترلی غیر همزمان شبیه سازی شده است. با این مدل می توان عملکرد ماشین سنکرون را در حالت ماندگار و گذرا بررسی کرد. با توجه به اینکه منابع عملی معمولاً دارای اندوکتانس هستند. در این مقاله اثر راکتانس منبع و کموتاسیون بین دو تریستور منظور شده است.

2. معرفی سیستم

سیستم موتور سنکرون - سیکلونورتر مذکور شامل یک سیکلونورتر شش پالسه سه فاز و یک موتور سنکرون قطب برجسته است. شکل 1 بلوک دیاگرام این سیستم را نشان می دهد.



شکل 1. بلوک دیاگرام سیستم موتور سنکرون-سیکلونورتر

3. مدل سیکلونورتر

در این سیستم هر سیکلونورتر سه فاز به تک فاز شامل دو یکسوکننده شش پالسه تریستوری است. سیکلونورتر شش پالسه دارای 36 تریستور که از شش پل یکسوکننده تشکیل شده است. هر فاز دارای دو پل یکسوکننده است که به صورت موازی - معکوس مطابق شکل 2 قرار گرفته اند. جریان های مثبت بار (I_o) را پل یکسوکننده (P) و جریان های منفی بار را یکسوکننده (N) تأمین خواهد کرد. برای تولید شکل موج خروجی نزدیک به شکل موج مرجع، فاصله زمانی پالس های آتش برای همه تریستورها نباید یکسان باشد. برای تحقق این مهم از روش کنترلی زمان بندی پالس ها بر اساس عبور از صفر موج کسینوسی¹ استفاده شده است [5]. بر اساس این روش،

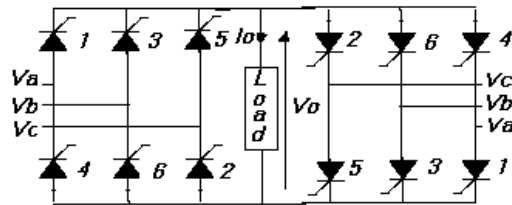
¹- Cosine wave crossing pulse timing

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

تریستورهایی در هر لحظه هدایت می کنند که دارای ولتاژ خروجی نزدیک ولتاژ مرجع باشند. با در نظر گرفتن اثر کموتاسیون، جریان تریستورها به صورت همزمان نمی تواند تغییر کند و قبل از اینکه یک تریستور خاموش شود تریستور بعدی شروع به هدایت می کند و در یک فاصله زمانی سه تریستور با هم هدایت خواهند کرد. این فاصله زمانی به عواملی از قبیل جریان تریستور موقع سوچپینگ، لحظه ای که کموتاسیون اتفاق می افتد و امیدانس تونن منبع بستگی دارد [2].



یکسوکننده (P)

یکسوکننده (N)

شکل 2. سیکلورکتور سه فاز به یک فاز شش پالسه

در این حالت ولتاژ خروجی (V_o) به صورت جدول 1 است.

جدول 1. ولتاژ خروجی پل های یکسوکننده

تریستورهای هادی	ولتاژ خروجی	تریستورهای هادی	ولتاژ خروجی
6 و 1	V_{ab}	4 و 3	V_{ba}
6 و 2 و 1	$V_a - (V_c + V_b)/2$	5 و 4 و 3	$(V_c + V_b)/2 - V_a$
2 و 1	V_{ac}	5 و 4	V_{ca}
3 و 2 و 1	$(V_a + V_b)/2 - V_c$	6 و 5 و 4	$V_c - (V_a + V_b)/2$
3 و 2	V_{bc}	6 و 5	V_{cb}
4 و 3 و 2	$V_b - (V_a + V_c)/2$	1 و 6 و 5	$(V_a + V_c)/2 - V_b$

ولتاژ خروجی یکسوکننده (N) برابر است با: $-V_o = -V_o^*$ جریان های ورودی سیکلورکتور سه فاز با اعمال ولتاژهای خروجی سیکلورکتور سه فاز به مدل موتور سنکرون به دست می آیند.

4. مدل موتور سنکرون

معادلات دیفرانسیل ماشین سنکرون قطب برجسته با سه سیم پیچ متقارن در استاتور یک سیم پیچ تحریک و دو سیم پیچ میراکننده روی محور طولی (d) و عرضی (q) روتور به صورت زیر است [1].

$$V = [V_f, V_d, V_q, 0, 0]^T \quad \text{در این رابطه} \quad [V] = [R][I] + P[\lambda] \quad (1)$$

p اپراتور مشتق، V_f ولتاژ تحریک میدان روتور و V_d و V_q ولتاژهای سه فاز استاتور در تبدیل پارک هستند.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

θ زاویه بین محور طولی (d) و فاز (a) استاتور است و $\lambda = [\lambda_d, \lambda_q, \lambda_f, \lambda_D, \lambda_Q]^T$ مقادیر λ به ترتیب شار دورهای محور طولی و عرضی استاتور، میدان تحریک و محور طولی و عرضی سیم پیچ های میراکننده هستند.

$$R = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & -L_q \omega r & 0 & -L_{mq} \omega r \\ L_{md} \omega r & L_d \omega r & R_s & L_{md} \omega r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

با توجه به رابطه $I = [L]^{-1} \lambda$ می توان رابطه (1) را به صورت زیر نوشت:

$$[V] = [R][L]^{-1} \lambda + P[\lambda] \quad (4)$$

در این رابطه مقدار $[L]^{-1}$ به صورت زیر است.

$$[L^{-1}] = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & 0 & A_3 & 0 \\ A_2 & A_4 & 0 & A_5 & 0 \\ 0 & 0 & A_6 & 0 & A_7 \\ A_3 & A_5 & 0 & A_8 & 0 \\ 0 & 0 & A_7 & 0 & A_9 \end{bmatrix} \quad (5)$$

مقادیر A1 الی A9 در پیوست 1 آورده شده است. معادله حرکت موتور به صورت زیر است.

$$JP\omega_r + B_m\omega_r = T_e - T_L \quad (6)$$

در این رابطه T_e : گشتاور الکتریکی، ω_r : سرعت زاویه ای مکانیکی روتور، T_L : گشتاور بار،

B_m : ضریب گشتاور میراکننده، J : ثابت اینرسی روتور

با جایگذاری مقادیر فوق در رابطه (4) و افزودن رابطه 6، معادلات دیفرانسیل موتور سنکرون بر حسب متغیر شار دور به صورت زیر خواهد شد.

$$\begin{aligned} P\lambda_d &= -R_S(A_2\lambda_f + A_4\lambda_d + A_5\lambda_D) + V_d + \omega_r\lambda_q \\ P\lambda_q &= -R_S(A_6\lambda_q + A_7\lambda_Q) + V_q - \omega_r\lambda_d \\ P\lambda_f &= -R_f(A_1\lambda_f + A_2\lambda_d + A_3\lambda_D) + V_f \\ P\lambda_D &= -R_D(A_3\lambda_f + A_5\lambda_d + A_8\lambda_D) \\ P\lambda_Q &= -R_Q(A_7\lambda_q + A_9\lambda_Q) \\ P\omega_r &= \frac{T_e - T_L - B_m\omega_r}{J} \end{aligned} \quad (7)$$

گشتاور تولیدی موتور (T_e) از رابطه زیر به دست می آید.

$$T_e = [\lambda_d(A_6\lambda_q + A_7\lambda_Q) - \lambda_q(A_2\lambda_f + A_4\lambda_d + A_5\lambda_D)] \quad (8)$$

با حل معادلات فوق مقادیر متغیرهای شار- دور و سرعت را می توانیم به دست آوریم و با استفاده از رابطه زیر می توانیم جریان های i_d و i_q ورودی موتور را به دست آوریم و با استفاده از تبدیل عکس پارک جریان های سه فاز استاتور به دست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} i_d &= A_2.\lambda_f + A_4.\lambda_d + A_5.\lambda_D \\ i_q &= A_6.\lambda_q + A_7.\lambda_Q \end{aligned} \quad (9)$$

5. مدل ریاضی سیستم موتور سنکرون - سیکلوکنورتور

برای به دست آوردن ولتاژهای ورودی موتور سنکرون دو حالت مختلف را در نظر می گیریم:

الف) حالتی که منبع دارای اندوکتانس نیست.

ب) در صورتی که منبع دارای اندوکتانس باشد.

در حالت الف ولتاژهای سه فاز ورودی موتور به صورت زیر است.

$$V_{Ao} = V_{O1} - V_{No}, \quad V_{Bo} = V_{O2} - V_{No}, \quad V_{Co} = V_{O3} - V_{No} \quad (10)$$

V_{Ao} ، V_{Bo} ، V_{Co} و ولتاژهای فاز ورودی موتور هستند. V_{O1} ، V_{O2} و V_{O3} ولتاژهای پلاریته مثبت خروجی سه فاز سیکلوکنورتر هستند.

در این رابطه اگر مرکز اتصال ستاره (N) به مرکز اتصال پلاریته منفی خروجی سیکلورکتورتر (نقطه o) متصل شود: $V_{NO} = 0$ در غیر

$$V_{NO} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 V_{oi} \quad (11)$$

اینصورت V_{NO} از رابطه زیر محاسبه می شود. (11)

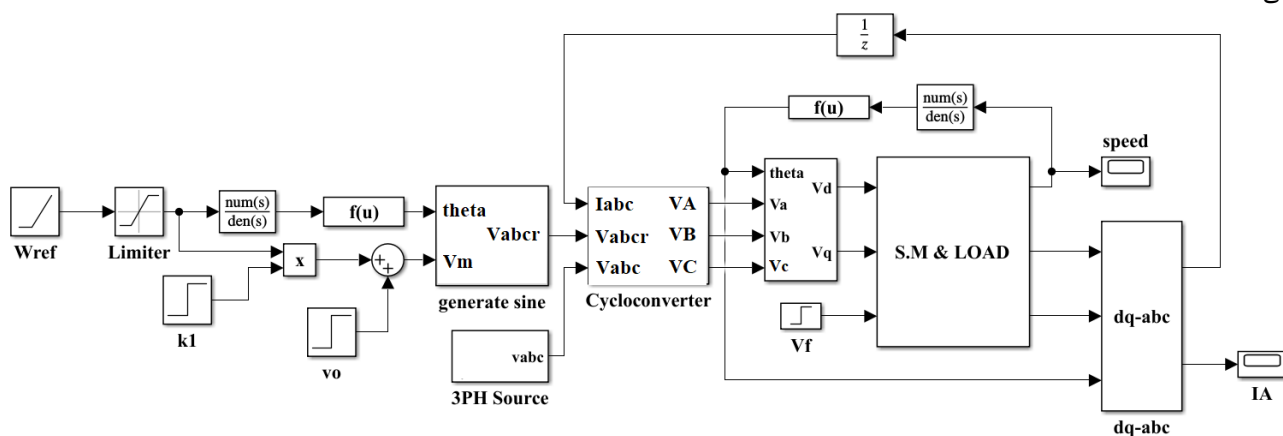
$$\begin{aligned} V_{Ao} &= V_{O1} - V_{NO} - \frac{Le}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{dI_i}{dt} \\ V_{Bo} &= V_{O2} - V_{NO} - \frac{Le}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{dI_i}{dt} \\ V_{Co} &= V_{O3} - V_{NO} - \frac{Le}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{dI_i}{dt} \end{aligned} \quad (12)$$

در این رابطه برای حالت بدون کموتاسیون $Le = 2 Ls$ و در حالت با کموتاسیون $Le = 1.5 Ls$ است. ولتاژهای V_{Ao} , V_{Bo} و V_{Co} با استفاده از تبدیل پارک به ولتاژهای V_d و V_q تبدیل می شوند و به مدل ماشین سنکرون مطابق رابطه (7) اعمال می شود.

6. راه اندازی ماشین سنکرون با استفاده از سیکلورکتورتر

در این حالت با توجه به اینکه ماشین های سنکرون گشتاور راه اندازی ندارند از روش کاهش فرکانس الکتریکی استاتور برای راه اندازی استفاده شده است. در این روش فرکانس الکتریکی استاتور را به حدی کاهش می دهیم که روتور بتواند خودش را با فرکانس استاتور هماهنگ کند. حال اگر به تدریج فرکانس استاتور را افزایش دهیم سرعت روتور هم افزایش می یابد. برای جلوگیری از تضعیف شار باید همزمان با کاهش فرکانس ولتاژ را هم کاهش دهیم در نتیجه در این راه اندازی از روش کنترلی حلقه باز ولت بر هرتز استفاده شده است که در عمل بیشتر از این روش استفاده می کنند [1]. شکل 3 بلوک دیاگرام راه اندازی ماشین سنکرون را با استفاده از این روش نشان

می دهد.



شکل 3. بلوک دیاگرام راه اندازی ماشین سنکرون با استفاده از روش کنترلی ولت بر هرتز

7. شبیه سازی

پارامترهای مورد استفاده برای موتور سنکرون در پیوست 2 آمده است. مقدار ولتاژ تحریک ثابت و برابر $0/25$ پریونیت در نظر گرفته شده است. مقدار گشتاور بار موتور در حالت ماندگار $0/9$ پریونیت و ضریب گشتاور میرایی $(0/05)$ است. فرکانس منبع برابر 60 هرتز و فرکانس موج مرجع برابر 12 هرتز است. اندوکتانس منبع برابر $(0/2 \text{ mH})$ فرض شده است. در حالت گذرای راه اندازی گشتاور بار متناسب با سرعت و برابر $(0.05\omega_r)$ است. سرعت ماشین سنکرون در راه اندازی با شیب $(0/05)$ در ثانیه افزایش می یابد و به مقدار نهایی $0/2$ پریونیت می رسد. در این شبیه سازی ترستورها ایده آل در نظر گرفته شده اند.

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

8. نتایج شبیه سازی

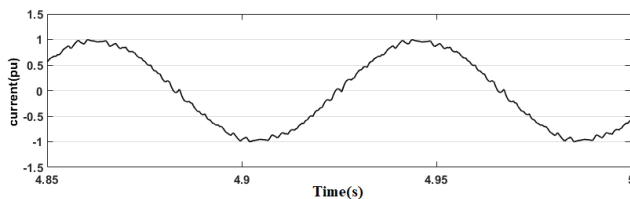
نتایج شبیه سازی انجام شده در حالت های زیر ارائه شده است:

الف) ولتاژ مرجع سینوسی بدون در نظر گرفتن کموتاسیون ($V_{No} \neq 0$ و $V_{No}=0$).

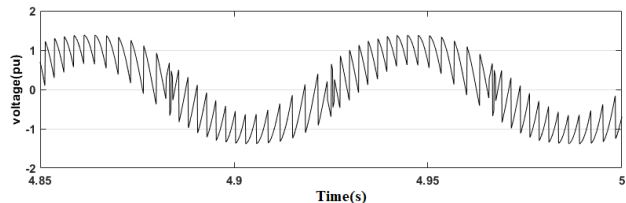
ب) ولتاژ مرجع سینوسی با در نظر گرفتن کموتاسیون ($V_{No}=0$ و $V_{No} \neq 0$).

شکل های (4-7) شکل موج های ولتاژ و جریان را در حالت (الف) نشان می دهند. به دلیل اندوکتانس زیاد بار جریان ورودی موتور در دو

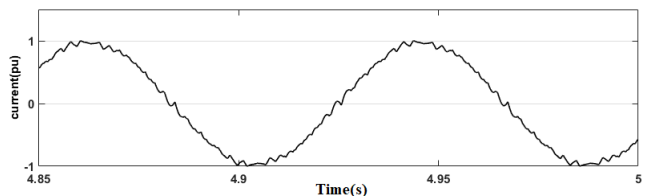
حالت تقریباً سینوسی است. ولتاژ خروجی در حالت ($V_{No} \neq 0$) به سینوسی نزدیکتر است.



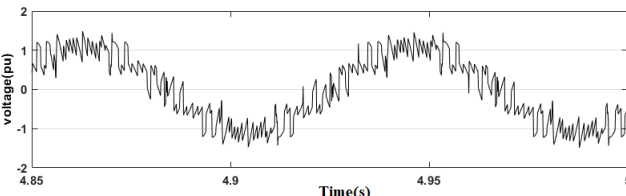
شکل 5. جریان استاتور موتور سنکرون در حالت بدون کموتاسیون و $V_{No}=0$



شکل 4. ولتاژ خروجی سیکلکنورتر در حالت بدون کموتاسیون و $V_{No}=0$



شکل 7. جریان استاتور موتور سنکرون در حالت بدون کموتاسیون و $V_{No} \neq 0$

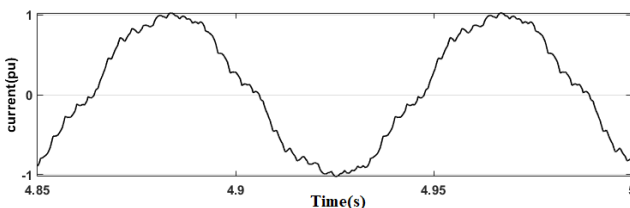


شکل 6. ولتاژ خروجی سیکلکنورتر در حالت بدون کموتاسیون و $V_{No} \neq 0$

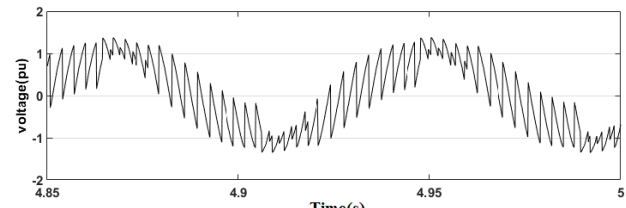
شکل های (8-11) شکل موج های ولتاژ و جریان را در حالت (ب) نشان می دهند. به دلیل افت ولتاژ ناشی از اندوکتانس منبع دامنه

ولتاژ خروجی کاهش می یابد جریان ورودی موتور هم تقریباً سینوسی است. ولتاژ خروجی در حالت ($V_{No} \neq 0$) نسبت به حالت های

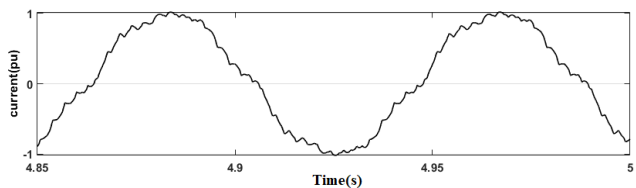
قبل سینوسی تر است.



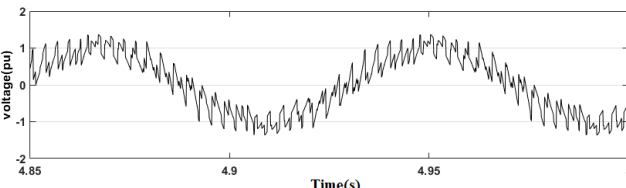
شکل 9. جریان استاتور موتور سنکرون در حالت بدون کموتاسیون و $V_{No}=0$



شکل 8. ولتاژ خروجی سیکلکنورتر در حالت بدون کموتاسیون و $V_{No}=0$



شکل 11. جریان استاتور موتور سنکرون در حالت با کموتاسیون و $V_{No} \neq 0$



شکل 10. ولتاژ خروجی سیکلکنورتر در حالت با کموتاسیون و $V_{No} \neq 0$

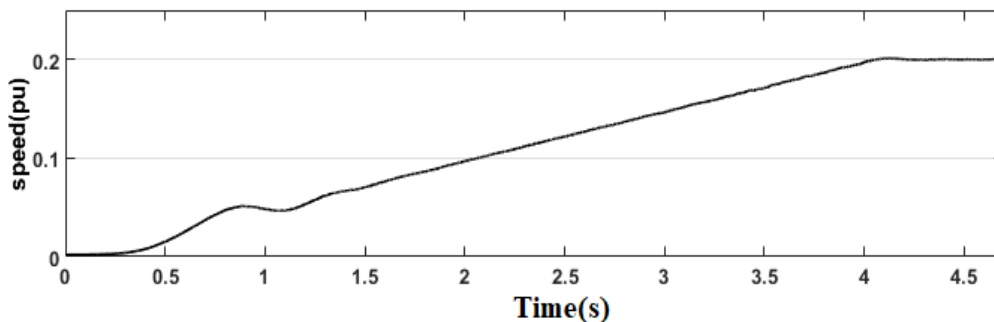
شکل 12 تغییرات سرعت را در راه اندازی ماشین سنکرون نشان می دهد. به دلیل زیاد بودن شیب افزایش فرکانس و خاصیت ذاتی روش

کنترل حلقه باز، نوساناتی در سرعت هنگام راه اندازی مشاهده می شود.

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

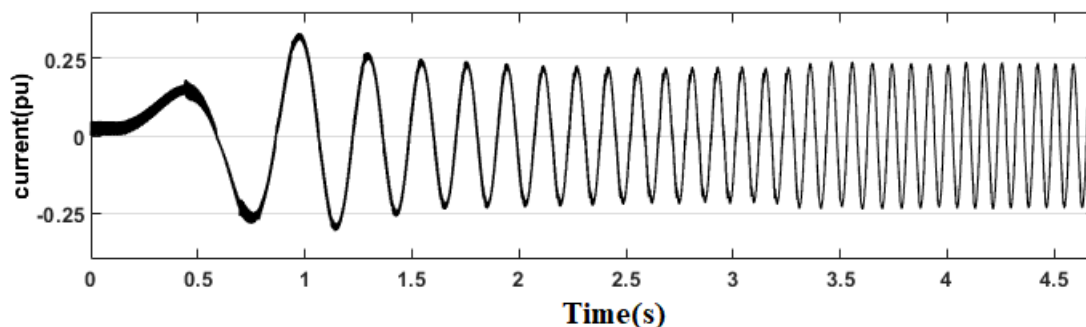
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir



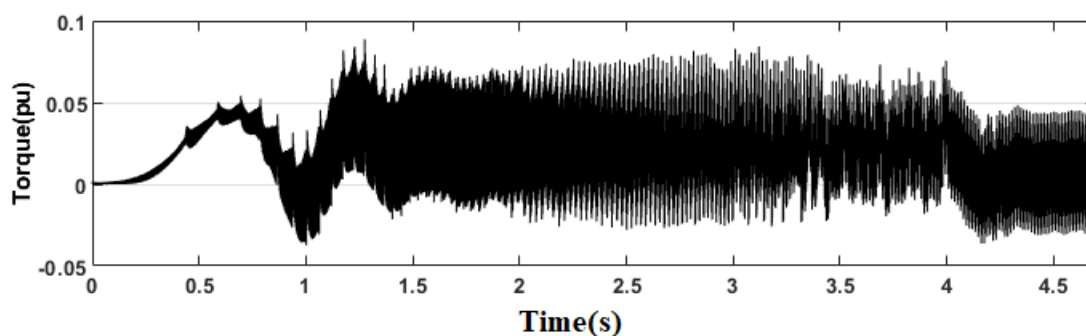
شکل 12. تغییرات سرعت موتور سنکرون در راه اندازی

شکل 13 تغییرات جریان ورودی موتور سنکرون را در راه اندازی نشان می دهد. مشاهده می شود که جریان راه اندازی کمی بیشتر از جریان حالت ماندگار است.



شکل 13. تغییرات جریان ورودی موتور سنکرون در راه اندازی

شکل 14 تغییرات گشتاور را هنگام راه اندازی نشان می دهد.



شکل 14. تغییرات گشتاور تولیدی موتور سنکرون در راه اندازی

با توجه به این نتایج می توان گفت که راه اندازی با استفاده از این روش مزایای زیادی نسبت به روش های دیگر راه اندازی دارد از جمله: جریان راه اندازی خیلی پایین، کم بودن نوسانات گشتاور در سرعت های پایین، کاهش زمان راه اندازی

9. نتیجه گیری

شبیه سازی سیستم موتور سنکرون-سیکلوکنورتر با استفاده از نرم افزار Matlab در محیط سیمولینک انجام گرفت. مدل ریاضی ماشین سنکرون و سیکلوکنورتر مورد بررسی قرار گرفت. شکل موج های ولتاژ و جریان ورودی موتور در حالت ولتاژ مرجع سینوسی با کموتاسیون و بدون کموتاسیون بررسی شد. راه اندازی ماشین سنکرون تغذیه شده از طریق سیکلوکنورتر با استفاده از روش کنترل حلقه باز انجام شد. با توجه به کم بودن نوسانات گشتاور، این سیستم در سرعت های پایین، به طور وسیعی در راه اندازی و تغذیه ماشین های

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

سنکرون در این سرعت ها به کار گرفته می شود. از این مدل می توان برای بررسی عملکرد این سیستم در حالت گذرا و ماندگار و به عنوان زمینه طراحی و ساخت مبدل های (AC-AC) استفاده کرد.

منابع

- [1] صلاح محمدی " راه اندازی استاتیک ماشین های سنکرون " پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف
- [2] J.P. TAMBY and V.I. JOHN and p. CHADWICK "A Direct optimum symmetry (DOS) spectral calculation method for cycloconverter synchronous motor drives system" IEEE Transactions on industrial electronic, PP.1092-1097. 1989
- [3] Fa – hai Li and Yao – hua Li and Xjang – heng Wang and Jing-de GAO "Modeling and simulation of synchronous motor fed by cycloconverter" power electronics specialists conf. IEEE, PP. 830-834. 1994
- [4] Zhenyuan Wang and Yilu Liu "Modeling and simulation of a cycloconverter drive system for harmonic studies" IEEE Transactions on industrial electronics, Vol.47, No.3 pp. 533-541, JUNE 2000
- [5] Shyama P. Das and Ajit K. Chattopadhyay "Observer-based stator-flux-oriented vector control of cycloconverter-fed synchronous motor drive" IEEE Transactions on industry applications, Vol. 33, No. 4. JULY/AUGUST 1997
- [6] B. R. Pelly "Thyristor phase controlled converters and cycloconverter" willey-interscience, 1971

پیوست 1

$$A_1 = \frac{[L_d L_D - L_{md}^2]}{D_1}, \quad A_2 = \frac{L_{md}[L_{md} - L_D]}{D_1}, \quad A_3 = \frac{[L_{md}^2 - L_d L_{md}]}{D_1}, \quad A_4 = \frac{[L_D L_f - L_{md}^2]}{D_1}$$
$$A_5 = \frac{L_{md}[L_{md} - L_f]}{D_1}, \quad A_6 = \frac{L_Q}{D_2}, \quad A_7 = -\frac{L_{mq}}{D_2}, \quad A_8 = \frac{[L_d L_f - L_{md}^2]}{D_1}$$
$$A_9 = \frac{L_q}{D_2}, \quad D = L_f L_d L_D - L_{md}^2 [L_f + L_D] - L_{md}^2 L_d + 2L_{md}^3, \quad D_2 = L_q L_Q - L_{mq}^2$$

پیوست 2

مقادیر نامی ماشین سنکرون به صورت زیر است.

60 Hz ، 20 A ، 220 V ، 10 hp ، چهار قطب، فرکانس مبنا برابر 60 هرتز، جریان مبنا برابر $20\sqrt{2}$ آمپر و ولتاژ مبنا برابر $200\sqrt{2/3}$ ولت است. پارامترهای ماشین بر اساس مبناهای فوق (پریونیت شده) به صورت زیر است.

$$R_D = 0.07203 \quad L_D = 1.83910 \quad L_D = 1.83910$$
$$L_q = 0.88450 \quad L_{mq} = 0.67436 \quad L_{mq} = 0.67436$$
$$L_{md} = 1.40052 \quad R_f = 0.01013 \quad R_f = 0.01013$$
$$R_Q = 0.06556 \quad L_Q = 0.83107 \quad L_Q = 0.83107$$