



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

สมบุรณ์ แสงวงศ์วณิชย์. เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา Solid-State Motor Drives(162538). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ภาษาอังกฤษ

- Boys, J. T. and Handley, P. G. Spread Spectrum Switching: Low Noise Modulation Technique for PWM Inverter Drives. IEE Proc-B., Vol. 139, No. 3, 1992, pp. 252-260.
- Fukuda, S. , Iwaji, Y. and Hasegawa, H. PWM Technique for Inverter with Sinusoidal Output Current. IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 5, No. 1, 1990, pp. 54-61.
- Habetler, T.G. and Divan, D. M. Acoustic Noise Reduction in Sinusoidal PWM Drives Using a Randomly Modulated Carrier. IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 6, No. 3, 1993, pp. 356-363.
- Holtz, J. and Beyer, B. Optimal Pulsewidth Modulation for AC-Servos and Low-Cost Industrial Drives. IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, 1994, pp. 1039-1047.
- Intel 8XC196MC USER'S MANUAL. Intel Corporation, 1992
- Iwaji, Y. and Fukuda, S. A Pulse Frequency Modulated PWM Inverter for Induction Motor Drives. IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 7, No. 2, 1992, pp. 404-410.
- Kenjo, T. Power Electronics for the Microprocessor Age. New York: Oxford University Press, 1990.
- Mohan, N. , Undeland, T. M. and Robbins, W. P. Power Electronics: Converters, Application and Design. New York: John Wiley & Sons Inc., 1989.
- Pedersen, J. K. , Blaabjerg, F. and Frederiksen, S. Reduction of Acoustic Noise Emission in AC-Machine by Intelligent Distributed Random Modulation. EPE Conf., No. 377, 1993, pp. 369-375.

Wallace, A. K. , Spee, R. and Martin, L. G. Current Harmonics and Acoustic Noise in AC Adjustable-Speed Drives. IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 26, No. 2, 1990, pp. 267-273.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

การคำนวณค่า I'_{hok}

เมื่อพิจารณาสมการ(3.6)

$$i'_{\text{hok}} = i_{\text{hok}} \cdot L_{\sigma} = \int_{t_s}^{t_s+T_0} (u(t, k) - u^*(t)) dt$$

สิ่งที่เราต้องการคือ สมการของ $|i'_{\text{hok}}|^2$ ซึ่งจะใช้ในการคำนวณ I'_{hok} เราจะพิจารณาเทอมอินทิกรัลของ $u(t, k)$ และ $u^*(t)$ เพื่อหาสมการของ i'_{hok} จากทฤษฎีในบทที่ 2 จะเห็นว่าสมการของเวกเตอร์แรงดันค่าตั้งคือ

$$u^*(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{\text{dc}} M e^{j\omega t}$$

เมื่อไม่มีการทำ over modulation และดัชนีการมอดูเลต $0 \leq M \leq 1$

ส่วนเวกเตอร์แรงดัน $u(t, k)$ จะมีสถานะที่แตกต่างกันใน 1 คาบการสวิตช์ โดยแบ่งได้เป็น 4 ช่วงดังนี้ (พิจารณาในเซกเตอร์ที่ 1)

$$\begin{aligned} u(t, k) &= V_0 = 0 && ; t_s < t < t_s + \frac{t_0}{2} \\ &= V_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{\text{dc}} && ; t_s + \frac{t_0}{2} < t < t_s + \frac{t_0}{2} + t_x \\ &= V_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{\text{dc}} e^{j\frac{\pi}{3}} && ; t_s + \frac{t_0}{2} + t_x < t < t_s + \frac{t_0}{2} + t_x + t_y \\ &= V_7 = 0 && ; t_s + \frac{t_0}{2} + t_x + t_y < t < t_s + T_0 \end{aligned}$$

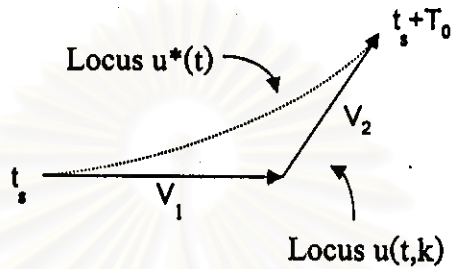
โดยที่

$$t_x = M T_0 \sin\left(\frac{\pi}{3} - \omega t_s\right)$$

$$t_y = M T_0 \sin(\omega t_s)$$

$$t_0 = T_0 - (t_x + t_y)$$

จากสมการของ $u'(t)$ เราจะเห็นว่าอินทิกรัลของ $u'(t)$ จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมเราจะเรียกอินทิกรัลของ $u'(t)$ นี้ว่า Locus $u'(t)$ ส่วนอินทิกรัลของเวกเตอร์แรงดัน $u(t,k)$ หรือ Locus $u(t,k)$ ก็จะมีการเคลื่อนที่ได้ขึ้นอยู่กับของ Locus $u'(t)$ โดยที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของคาบการสวิตช์จะมีตำแหน่งตรงกัน(Fukuda, Iwaji and Hasegawa, 1990)ดังแสดงในรูปที่ ผ.ก. 1



รูปที่ ผ.ก.1 เส้นการเคลื่อนที่ของ Locus $u'(t)$ และ Locus $u(t,k)$

เพื่อให้ง่ายในการคำนวณเราจะกำหนดให้ $U_{dc} = 1$ ดังนั้นอินทิกรัลของ $u'(t)$ คือ

$$\int u'(t) dt = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t}$$

และอินทิกรัลของ $u(t,k)$ จะแบ่งได้เป็น 4 ช่วงคือ

ช่วงที่ 1 ; $t_s < t < t_s + \frac{t_0}{2}$

$$\int_{t_s}^{t_s + \frac{t_0}{2}} u(t,k) dt = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t}$$

ช่วงที่ 2 ; $t_s + \frac{t_0}{2} < t < t_s + \frac{t_0}{2} + t_x$

$$\int_{t_s}^{t_s + \frac{t_0}{2}} u(t,k) dt = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t} + \sqrt{\frac{2}{3}} (t - (t_s + \frac{t_0}{2}))$$

ช่วงที่3 ; $t_s + \frac{t_0}{2} + t_x < t < t_s + \frac{t_0}{2} + t_x + t_y$

$$\int_{t_s}^{t_s+T_0} u(t, k) dt = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t_s} + \sqrt{\frac{2}{3}} t_x + \sqrt{\frac{2}{3}} e^{j\frac{\pi}{3}} (t - (t_s + \frac{t_0}{2} + t_x))$$

ช่วงที่4 ; $t_s + \frac{t_0}{2} + t_x + t_y < t < t_s + T_0$

$$\int_{t_s}^{t_s+T_0} u(t, k) dt = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega(t_s+T_0)}$$

เราสามารถหาสมการของ i'_{hok} ได้ดังนี้

ช่วงที่1 ; $t_s < t < t_s + \frac{t_0}{2}$

$$i'_{hok1} = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t_s} + j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t}$$

เมื่อพิจารณาแยกเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพ

$$\text{real1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} (\sin(\omega t_s) - \sin(\omega t))$$

$$\text{im.1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} (\cos(\omega t) - \cos(\omega t_s))$$

$$\therefore |i'_{hok1}|^2 = \text{real}^2 + \text{im.1}^2$$

ช่วงที่2 ; $t_s + \frac{t_0}{2} < t < t_s + \frac{t_0}{2} + t_x$

$$i'_{hok2} = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t_s} + \sqrt{\frac{2}{3}} (t - (t_s + \frac{t_0}{2})) + j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t}$$

$$\text{real2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} (\sin(\omega t_s) - \sin(\omega t)) + \sqrt{\frac{2}{3}} (t - (t_s + \frac{t_0}{2}))$$

$$\text{im.2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} (\cos(\omega t) - \cos(\omega t_s))$$

$$\therefore |i'_{\text{hok2}}|^2 = \text{real}2^2 + \text{im}2^2$$

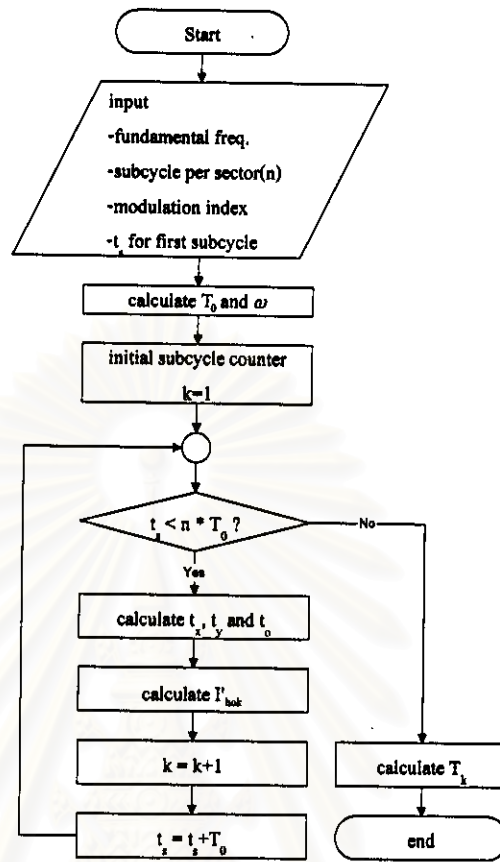
$$\text{ช่วงที่ 3. ; } t_s + \frac{t_0}{2} + t_x < t < t_s + \frac{t_0}{2} + t_x + t_y$$

$$\begin{aligned} i'_{\text{hok3}} &= -j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t} + \sqrt{\frac{2}{3}} t_x + \sqrt{\frac{2}{3}} e^{j\frac{\pi}{3}} (t - (t_s + \frac{t_0}{2} + t_x)) + j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t} \\ \text{real3} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} (\sin(\omega t_s) - \sin(\omega t)) + \sqrt{\frac{2}{3}} t_x + \frac{1}{\sqrt{6}} (t - (t_s + \frac{t_0}{2} + t_x)) \\ \text{im.3} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} (\cos(\omega t) - \cos(\omega t_s)) + \frac{1}{\sqrt{2}} (t - (t_s + \frac{t_0}{2} + t_x)) \\ \therefore |i'_{\text{hok3}}|^2 &= \text{real3}^2 + \text{im.3}^2 \end{aligned}$$

$$\text{ช่วงที่ 4. ; } t_s + \frac{t_0}{2} + t_x + t_y < t < t_s + T_0$$

$$\begin{aligned} i'_{\text{hok4}} &= -j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega(t_s + T_0)} + j \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} e^{j\omega t} \\ \text{real4} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} (\sin(\omega(t_s + T_0)) - \sin(\omega t)) \\ \text{im.4} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{M}{\omega} (\cos(\omega t) - \cos(\omega(t_s + T_0))) \\ \therefore |i'_{\text{hok4}}|^2 &= \text{real4}^2 + \text{im.4}^2 \end{aligned}$$

จากสมการของ $|i'_{\text{hok}}|^2$ ทั้ง 4 ช่วงและสมการ t_x , t_y และ t_0 เราสามารถเขียนโปรแกรมบน MATLAB เพื่อทำ numerical integration ได้โดยใช้ฟังก์ชัน trapz หรือการอินทิเกรตแบบสี่เหลี่ยมทางมุม โดยมีแผนผังโปรแกรมดังนี้



รูปที่พ.ก.2 แผนผังโปรแกรมการคำนวณค่า I'_{hok}

เริ่มต้นโปรแกรมจะให้ป้อนข้อมูลของความถี่หลักมูล จำนวนsubcycleในหนึ่งเซกเตอร์ ดัชนีการมอดูเลต และค่าเวลาเริ่มต้น t_s สำหรับ subcycle แรก จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณ คาบเวลาการสวิตช์ (T_0) และความถี่หลักมูลเชิงมุม (ω) เพื่อใช้ในสมการของ $|i'_{hok}|^2$ ทั้ง 4 ช่วง และเริ่มต้นทำการคำนวณทีละ subcycle เมื่อคำนวณค่า I'_{hok} ของ subcycle แรกเสร็จแล้วก็วนรอบเพื่อคำนวณใน subcycle ต่อไปจนครบทุก ๆ subcycle จากนั้นก็จะนำค่า I'_{hok} ที่คำนวณได้ใน ทุก ๆ subcycle ไปคำนวณค่า T_k ตามสมการ (3.13) ดังนั้น โปรแกรมนี้จะได้ผลลัพธ์สองอย่างคือ ค่า I'_{hok} และ T_k ซึ่งค่า T_k ที่ได้เป็นค่าโดยประมาณ ถ้าเราต้องการค่า T_k ที่ถูกต้องจะต้องนำค่า T_k ที่คำนวณได้นี้ไปเป็นค่าเริ่มต้นของการทำ iteration ดังแสดงในภาคผนวก ข. ค่าที่คำนวณได้จะเป็นค่า discrete ถ้าเราต้องการผลลัพธ์ที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง เราจะต้องคำนวณอีกหลายๆครั้ง โดยเปลี่ยนค่า t_s เริ่มต้น ผลที่ได้จะมีความใกล้เคียงฟังก์ชันต่อเนื่องมากขึ้น

ภาคผนวก ข.

การทำ iteration เพื่อคำนวณหาค่า T_k ที่ถูกต้อง

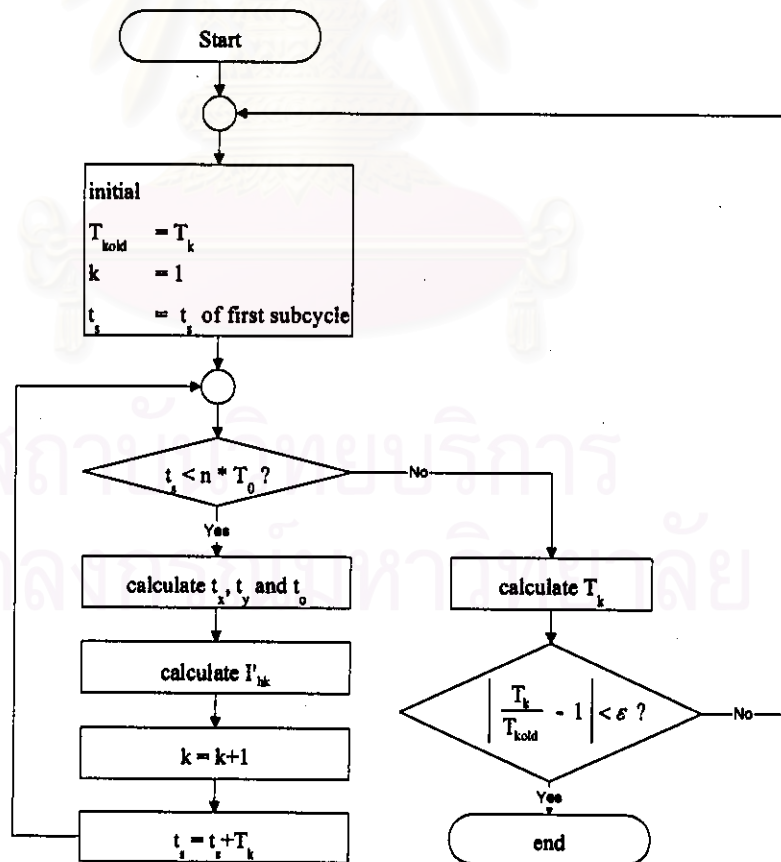
เมื่อเราสามารถคำนวณค่า T_k โดยประมาณของแต่ละ subcycle ได้ตามภาคผนวก ก. แล้ว จะเห็นว่าขณะนี้คาบเวลาของแต่ละ subcycle จะไม่คงที่อีกแล้ว ดังนั้นในการคำนวณ t_x , t_y และ t_0 จะต้องใช้สมการใหม่ดังนี้

$$t_x = M T_k \sin\left(\frac{\pi}{3} - \omega t_s\right)$$

$$t_y = M T_k \sin(\omega t_s)$$

$$t_0 = T_k - (t_x + t_y)$$

โดยที่สมการของ $|i'_{\text{hok}}|^2$ ทั้ง 4 ช่วงตามภาคผนวก ก. ยังคงใช้เหมือนเดิมเพียงแต่เปลี่ยน คาบเวลาของ subcycle จาก T_0 เป็น T_k ในการเริ่มต้นทำ iteration จะต้องคำนวณค่า T_k เริ่มต้นไว้ก่อนดังแสดงในภาคผนวก ก. โดยนำค่า T_k นั้นมาเป็นค่าเริ่มต้นในการทำ iteration ดังแผนผังโปรแกรมต่อไปนี้



รูปที่ผ.ข.1 แผนผังโปรแกรมการคำนวณค่า T_k ด้วยวิธี iteration

จะเห็นว่าโปรแกรมมีลักษณะการทำงานเหมือนกันในภาคผนวก ก. เพียงแต่จะมีการตรวจสอบค่า T_k ว่ามีค่าคงตัวหรือยังโดยถ้าค่า T_k มีค่าใกล้เคียงกับค่า T_{old} (ค่า T_k ที่คำนวณได้ในครั้งที่แล้ว) มากๆ โดย $\left| \frac{T_k}{T_{old}} - 1 \right| < \epsilon$ และ ϵ คำน้อยมากๆ (ใช้ค่า $\epsilon = 10^{-12}$) จะถือว่า T_k ไม่เปลี่ยนแปลงแล้วก็จะสิ้นสุดการทำ iteration



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความเหนี่ยวนำของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ $L_s = 220\text{mH}$

ความเหนี่ยวนำของขดลวดทางด้านโรเตอร์ $L_r = 220\text{mH}$

ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ $M = 203\text{mH}$

ความต้านทานของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ $R_s = 1.25\ \Omega$

ความต้านทานของขดลวดทางด้านโรเตอร์ $R_r = 1.92\ \Omega$

จำนวน pole = 4 poles

ค่าพิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

กำลังของมอเตอร์ = 3 hp 2.2 kW

แรงดันพิกัด = 220/380 V (Delta/Y)

กระแสพิกัด = 9.0/5.2 A (220/380 V)

ความถี่พิกัด = 50 Hz

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียน

นายภักดี วรเพียร เกิดเมื่อวันที่ 30 ตุลาคม 2515 ที่กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงไฟฟ้ากำลัง (อิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบควบคุม)จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2537 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2538



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย