บทที่ 3
การหาแบบแผนการแปรความถี่การสวิตช์

เพื่อที่จะหาแบบแผนการแปรความถี่การสวิตช์ที่ทำให้สเปกตรัมของกระแสมีการกระจายที่ดี เราจะเริ่มต้นจากการศึกษาถึงกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์แรงดันที่มีความถี่การสวิตช์คงที่ โดยพิจารณาในแต่ละ subcycle (Holtz and Beyer, 1994) และนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการพิจารณาหาแบบแผนการแปรความถี่การสวิตช์

<u>การวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกในระบบอินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์แรงดัน</u>

เมื่อพิจารณาระบบที่มีการมอดูเลตแบบขอบคู่ (double edge) จะเห็นว่าหน่วยที่เล็กที่สุดของคาบการสวิตช์ ก็คือ subcycle เมื่อพิจารณาในระบบที่มีความถี่การสวิตช์คงที่ คาบเวลาของ subcycle คือ

$$T_0 = \frac{1}{2f_s} \qquad (3.1)$$

เมื่อ f_s คือ ความถี่การสวิตช์

จำนวนของ subcycle ในหนึ่งคาบความถี่หลักมูล f_1 คือ

$$n = \frac{1}{T_0 f_1} \qquad (3.2)$$

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่ฮาร์มอนิกจะเป็นเพียงค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล ดังนั้นสเปซเวกเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกของ subcycle ที่ k จะคำนวณได้จาก

$$i_{hok} = \frac{1}{L_\sigma}\int_{t_s}^{t_s+T_0}(u(t,k)-u^*(t))dt \qquad (3.3)$$

โดยที่

i_{hok} คือ สเปซเวกเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกสำหรับ subcycle ที่ k โดย k=1 ,..., n และคาบเวลาของ subcycle คงที่เท่ากับ T_0

t_s คือ เวลาเริ่มต้นของ subcycle ที่ k

$u(t,k)$ คือ เวกเตอร์แรงดันที่สร้างขึ้นจากสวิตช์กำลังใน subcycle ที่ k

$u^*(t)$ คือ สเปซเวกเตอร์ของแรงดันคำสั่ง

L_σ คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของมอเตอร์

เนื่องจากสมการที่(3.3)เป็นการพิจารณาค่ากระแสฮาร์มอนิกของแต่ละ subcycle ในสเปซ ดังนั้นค่าที่คำนวณได้จึงเป็นจำนวนเชิงซ้อน เพื่อที่จะหาค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกใน subcycle ที่ k จึงคำนวณจากขนาดของ i_{hok} ดังนี้

$$I_{hok} = \sqrt{\frac{1}{T_0}\int_{t_s}^{t_s+T_0}\left|i_{hok}\right|^2 dt} \tag{3.4}$$

ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกในหนึ่งคาบความถี่หลักมูลคือ

$$I_{ho} = \sqrt{\frac{1}{nT_0}\sum_{k=1}^{n}\int I^2_{hok}\,dt} \tag{3.5}$$

จากสมการที่(3.3) และ (3.4) เราสามารถหาค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละ subcycle ได้ โดยคำนวณออกมาในรูปของ $I_{hok}\,.\,L_\sigma$ และทำเป็นค่า normalize เนื่องจากค่า L_σ จะไม่มีผลในการคำนวณหาค่า optimum ของคาบเวลาของแต่ละ subcycle ดังจะแสดงให้เห็นต่อไป ดังนั้น สมการที่ (3.3) จะดัดแปลงเป็น

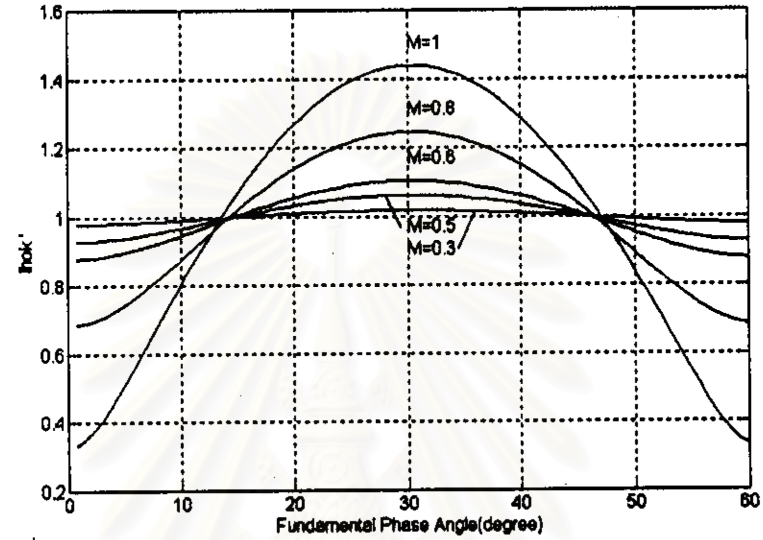
$$i'_{hok} = i_{hok}\,.\,L_\sigma = \int_{t_s}^{t_s+T_0}(u(t,k) - u^*(t))\,dt \tag{3.6}$$

และสมการที่ (3.4) จะดัดแปลงเป็น

$$I'_{hok} = I_{hok}\,.\,L_\sigma = \sqrt{\frac{1}{T_0}\int_{t_s}^{t_s+T_0}\left|i'_{hok}\right|^2 dt} \tag{3.7}$$

จากสมการ(3.6) และ (3.7) จะมีการคำนวณที่ซับซ้อน เนื่องจากใน 1 subcycle(คาบเวลา T_0) เวกเตอร์แรงดัน u(t,k) จะมีการเปลี่ยนแปลง 4 ครั้ง ($V_0 \rightarrow V_x \rightarrow V_y \rightarrow V_7$) และเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง $u^*(t)$ ก็เป็นจำนวนเชิงซ้อนเนื่องจากเป็นเวกเตอร์ในสเปซ ดังนั้น จึงใช้การเขียนโปรแกรมด้วย

MATLAB เพื่อช่วยในการคำนวณ โดยมีรายละเอียดในภาคผนวก ก. ผลการคำนวณค่า I'_{hok} ซึ่งเป็นค่า normalized แสดงในรูปที่3.1



รูปที่3.1 กราฟแสดงค่า normalized ของค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิก ในแต่ละ subcycle (พิจารณาใน 1 เซกเตอร์)

จากรูปที่3.1 จะเห็นว่าในแต่ละ subcycle จะมีค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกไม่เท่ากันโดยที่จุดเริ่มต้นของแต่ละเซกเตอร์($\omega t = n\pi /3$; n = 1 , 2 , ... , 6) จะมีขนาดของกระแสฮาร์มอนิกต่ำที่สุด และที่จุดกึ่งกลางของเซกเตอร์จะมีค่ากระแสฮาร์มอนิกสูงที่สุด และความแตกต่างของค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละ subcycle จะลดลงตามดัชนีการมอดูเลต

ความแตกต่างของค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละ subcycle ดังแสดงในรูปที่3.1 ทำให้มีผู้เสนอแนวคิดว่า ถ้าคิดโดยประมาณว่าค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกแปรผันตรงกับคาบเวลาของ subcycle จะทำให้เราสามารถปรับคาบเวลาของแต่ละ subcycle เพื่อให้ได้ค่า THD ของกระแสในหนึ่งคาบความถี่หลักมูลมีค่าต่ำที่สุดได้ แนวคิดดังกล่าวเรียกว่าวิธี optimal subcycle (Holtz and Beyer, 1994) ผลที่ได้จากการทำ optimal subcycle จะทำให้ได้สัญญาณ PWM ที่มีการแปรความถี่การสวิตช์(เนื่องจากคาบเวลาของแต่ละ subcycle ไม่เท่ากัน) ซึ่งเราสามารถคำนวณหาแบบแผนการแปรความถี่การสวิตช์โดยวิธี optimal subcycle ได้ดังนี้

เราเริ่มพิจารณาในกรณีที่คาบเวลาของแต่ละ subcycle มีค่าไม่คงที่เท่ากับ T_k โดยที่ผลรวมของทุก ๆ คาบเวลา T_k ยังคงเท่ากับคาบเวลาของความถี่หลักมูล

$$\sum_{k=1}^{n} T_k = nT_0 = \frac{1}{f_1} \tag{3.8}$$

ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละ subcycle จะแปรผันตรงกับคาบเวลาของแต่ละ subcycle โดยประมาณ(Holtz and Beyer, 1994) นั่นคือ

$$I_{hk} = \frac{T_k}{T_0} I_{hok} \tag{3.9}$$

เพื่อที่จะ optimize ค่าของ T_k จะพบว่าค่า THD ของกระแสจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกในทุก ๆ subcycle มีค่าเท่ากัน(Holtz and Beyer, 1994)

$$I_{h1} = I_{h2} = \ldots = I_{hn} = I_{hmin} \tag{3.10}$$

จากสมการที่ (3.8),(3.9) และ (3.10) จะได้ว่า

$$I_{hmin} = \frac{n}{\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{I_{hok}}} \tag{3.11}$$

ดังนั้นค่า optimum ของ T_k สามารถหาได้จากสมการ(3.9) และ (3.11)

$$T_k = \frac{nT_0}{I_{hok} \cdot \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{I_{hok}}} \tag{3.12}$$

จากสมการที่(3.12) จะเห็นว่า ค่า T_k จะขึ้นอยู่กับ I_{hok} ของแต่ละ subcycle ถ้า subcycle ใดมีค่า I_{hok} น้อยก็มีค่า T_k มาก ถ้า subcycle ใดมีค่า I_{hok} มากก็จะมีค่า T_k น้อย เพื่อปรับให้ทุก ๆ subcycle มีค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกเท่ากัน

จากสมการที่ (3.7) และ (3.12) จะได้ว่า

$$T_k = \frac{nT_0}{I'_{hok} \cdot \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{I'_{hok}}} \tag{3.13}$$

นั่นคือค่า L_σ ไม่มีผลในการคำนวณค่า T_k ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

การคำนวณสมการที่(3.13) เริ่มต้นจากการกำหนดให้ความถี่การสวิตช์มีค่าคงที่(T_k=T_0) แต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้วจะพบว่า ค่าเริ่มต้นของ subcycle ใด ๆ จะขึ้นอยู่กับคาบเวลาของ subcycle ก่อนหน้านั้นด้วย ดังนั้นเราสามารถหาค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละ subcycle ได้ใหม่โดยปรับปรุงสมการที่ (3.7) ได้ดังนี้

$$I'_{hk} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \int_{t_{sk}}^{t_{sk}+T_k} \left| i'_{hk} \right|^2 dt} \tag{3.14}$$

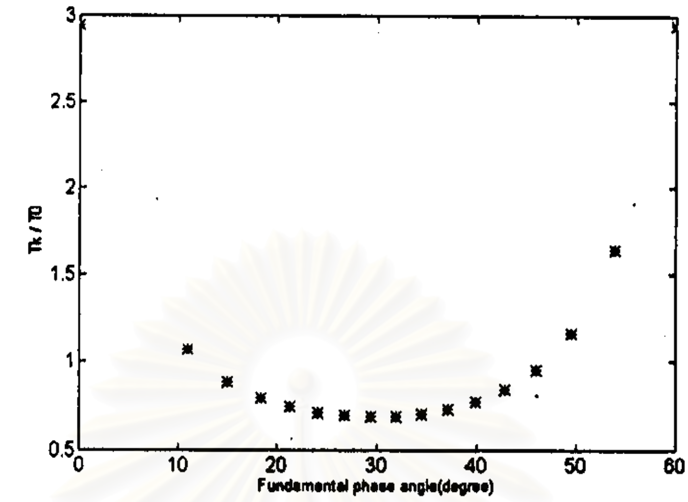
เมื่อ $t_{sk} = t_{s(k-1)} + T_{(k-1)}$

เพื่อให้คำนวณว่า T_k ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์นี้จะเสนอวิธี numerical iteration method โดยใช้โปรแกรมบน MATLAB ค่า T_k ที่ได้จากสมการที่(3.13) จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการทำ iteration ด้วยสมการที่(3.14) และ (3.15)

$$T_k = \frac{nT_0}{I'_{hk} \cdot \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{I'_{hk}}} \tag{3.15}$$

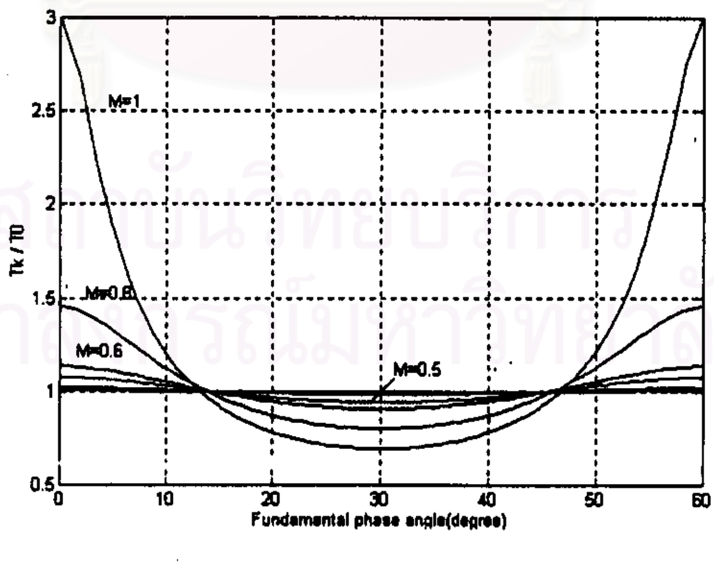
ค่า T_k ที่ได้จากสมการที่(3.13) จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณคาบเวลาของ subcycle ชุดแรกคือ T_{1k} เมื่อใช้คาบเวลา T_{1k} เหล่านี้ในการคำนวณค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิก I'_{h1k} ในแต่ละ subcycle ตามสมการ(3.14) และนำค่า I'_{h1k} แทนลงในสมการ(3.15) จะได้คาบเวลาของ subcycle ชุดที่สองคือ T_{2k} แล้วนำไปคำนวณซ้ำ(iteration) ตามขั้นตอนข้างต้น จนกระทั่งการคำนวณซ้ำให้ชุดของคาบเวลาของ subcycle ที่ต่างกันน้อยมาก

วิธีการทำ iteration จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข. ผลของการคำนวณซึ่งเป็นค่า discrete แสดงดังรูปที่ 3.2



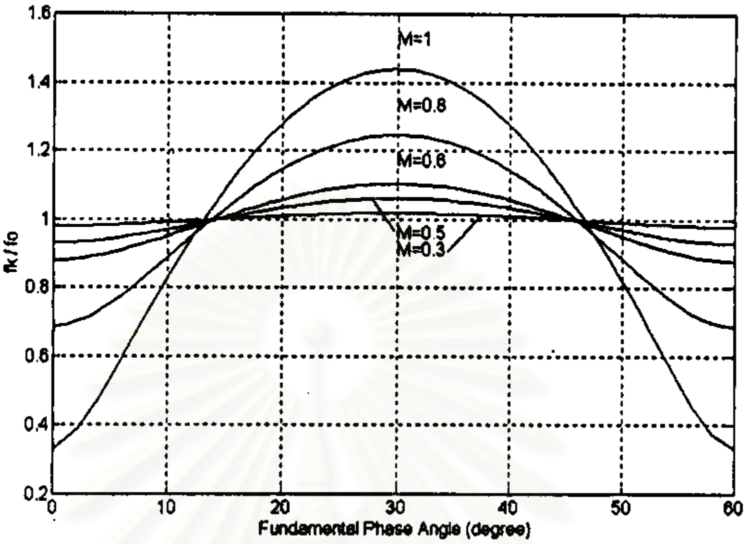
รูปที่3.2 ค่า discrete ของ T_k/T_0 เมื่อคำนวณที่ 16 subcycle ต่อ 1 เซกเตอร์ และมีค่า ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1

เมื่อต้องการฟังก์ชันที่ต่อเนื่องเราสามารถเลื่อนเวลาเริ่มต้น t_s ได้ เมื่อเลื่อนค่าเวลาเริ่มต้น t_s ไปเรื่อย ๆ จะได้ กราฟที่ต่อเนื่องดังรูปที่3.3



รูปที่3.3 ค่าฟังก์ชันต่อเนื่องของ T_k/T_0 ที่ค่าดัชนีการมอดูเลตต่าง ๆ

เมื่อเรามองฟังก์ชันของ T_k/T_0 ในรูปความถี่ f_k/f_0 จะได้กราฟดังรูปที่3.4



รูปที่3.4 ค่าฟังก์ชันต่อเนื่องของ f_k/f_0 ที่ดัชนีการมอดูเลตต่าง ๆ

จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบรูปที่3.4 กับรูปที่3.1 ซึ่งเป็นค่า normalized เหมือนกันจะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากนั่นคือที่ subcycle ใดที่มีค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกต่ำก็จะมีค่า f_k ต่ำ (T_k มีค่ามาก) และที่ subcycle ใดมีค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกสูงก็จะมีค่า f_k สูง (T_k มีค่าต่ำ) ดังนั้นจะพบว่า ผลการคำนวณด้วยวิธี iteration มีความสอดคล้องกับกราฟของค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกในรูปที่3.1

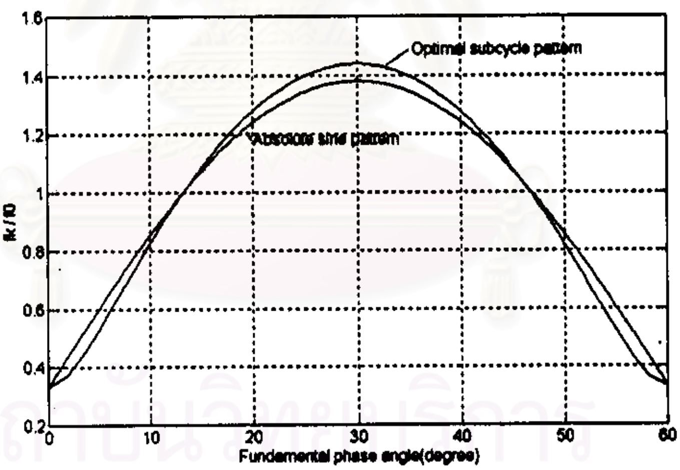
ผลของการทำ optimal subcycle ทำให้มีการแปรความถี่การสวิตช์เพื่อทำให้ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกมีค่าเท่ากันในทุกๆ subcycle จากรูปที่3.4จะเห็นว่าพิสัยการแปรความถี่การสวิตช์จะขึ้นอยู่กับดัชนีการมอดูเลต ซึ่งพิสัยการแปรความถี่การสวิตช์จะเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดลักษณะการกระจายสเปกตรัมของกระแส โดยจะเห็นว่าที่ดัชนีการมอดูเลตมีค่าต่ำจะมีพิสัยการแปรความถี่การสวิตช์ที่แคบ ทำให้สเปกตรัมของกระแสกระจายไม่ดี โดยจะมีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่ม ซึ่งพิสัยการแปรความถี่การสวิตช์ควรจะมีความกว้างอย่างน้อย 1 ออกเทฟ(ความถี่สูงสุดมีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่ต่ำสุด) เพื่อให้สเปกตรัมของกระแสมีการกระจายตัวที่ต่อเนื่องไม่จับเป็นกลุ่ม ดังนั้นที่ดัชนีการมอดูเลตค่าต่ำจะต้องใช้พิสัยการแปรความถี่การสวิตช์ที่กว้างกว่าที่คำนวณได้จากวิธี optimal subcycle เป็นผลให้ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละ subcycle มีค่าไม่เท่ากัน นั่นคือค่า THD ของกระแสจะสูงขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่เราต้องยอมรับ เนื่องจากเราเน้นในเรื่องการกระจายสเปกตรัมของกระแส ด้วยเหตุนี้ วิทยานิพนธ์นี้จะคงค่าแบบแผนการแปรความถี่การสวิตช์ที่

มีพิสัยการแปรความถี่ที่กว้างที่สุดคือที่ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1 เพื่อให้ได้การกระจายสเปกตรัมของกระแสที่ดีและมีค่า THD ของกระแสต่ำสุดที่ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1 ผลการจำลองระบบจะแสดงให้เห็นถึงกระจายสเปกตรัมของกระแสและรูปร่างของกระแส ณ. ดัชนีการมอดูเลตต่างๆ โดยมีรายละเอียดในบทที่ 4

<u>การประมาณค่าของแบบแผนการแปรความถี่การสวิตช์</u>

เมื่อพิจารณารูปที่3.4 จะเห็นว่าฟังก์ชัน f_k/f_0 ที่เราเลือกใช้ ณ. ค่าดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1 มีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ของไซน์ที่มีค่า dc offset มาก ดังแสดงในรูปที่3.5 ดังนั้นเราอาจประมาณแบบแผนการแปรความถี่การสวิตช์ที่ได้จากวิธี numerical ให้เป็นฟังก์ชันง่ายๆโดยมีค่าความถี่การสวิตช์เฉลี่ยเท่ากัน ได้ดังนี้

$$\frac{f_k}{f_0} = 1.05\left|\sin(3\omega_1 t)\right| + 0.3315 \qquad (3.13)$$



รูปที่3.5 ค่าฟังก์ชันต่อเนื่องของ f_k/f_0 ที่ ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ1 ที่คำนวณโดยวิธี optimal subcycleเปรียบเทียบกับค่าที่ประมาณโดยฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ของไซน์

ด้วยการใช้ฟังก์ชันโดยประมาณง่าย ๆ ดังนี้ ทำให้สะดวกในการประยุกต์ใช้กับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จะต้องสร้างตารางแปรความถี่การสวิตช์ โดยสามารถคำนวณได้ง่าย ๆ โดยใช้ภาษาระดับสูง เช่น ภาษาซี ในการสร้างตารางขึ้น