รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

นเรศ เพ็ชรนิน. การตรวจจับ Harmonics สำหรับ Active Power Filter โดยใช้ Neural Network. เอกสารรวมเล่มการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 19 ณ โรงแรมเจริญธานีปริ๊นเซส จ.ขอนแก่น วันที่ 7 - 8 พฤศจิกายน 2539 หน้า DS-28 - DS-32.

สรรค์ธิพงษ์ โฆษิตเกษม. วงจรกรองกำลังแอกทีฟขนานแบบไฮบริดสำหรับกำจัดฮาร์มอนิก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

ภาษาอังกฤษ

A.Mariscotti. "Fast and scalable spectrum analysis via Recursive Discrete Fourier Transform". ICHQP Conf. Rec., Oct. 16-18, 1996, pp.370-373.

A.Salem nia and S.Saadate. "Digital Control Active Filter Suppressing Particular Harmonics : Numerical Simulation and Experimentation". Proc. of ICHQP-Las Vegas , pp.632-636, 1996.

E.Destobbeleer, L.Protin. "On the Detection of Load Active Currents for Active Filter Control". IEEE Trans. on Power Electronics Vol. 11, NO.6 November, pp. 768-775, 1996.

F.Z.Peng , M.Kohata , and H.Akagi . "Compensation Characteristic of Shunt Active and Series Active Filters" . Chinese-Japanese Power Electronics Conference , pp.381-387 , 1992.

H.Akagi and A.Nabae . "Control Strategy of Active Power Filters Using Multiple Voltage-Source PWM Converters" . IEEE Tran. Ind. App. Vol. IA-22 , No.3 May/June , pp. 460-465 , 1986.

H.Akagi , Y.Kanazawa , and A.Nabae . "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits" . Proc.of IPEC-Tokyo , pp.1375-1386 , 1983.

IEEE Standard 519-1992 . "IEEE Recommened Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems" . IEEE , pp. 78 , 1992.

J.S.Tepper, J.W.Dixon, G.Venegas, L.Moran. "A Simple Frequency-Independent Method for Calculating the Reactive and Harmonic Current in a Nonlinear Load". IEEE Trans. on Industrial Electronics Vol. 43, NO.6 December, pp. 647-654, 1996.

L.S.Czarnecki. "Power Theory of Electrical Circuits with Quasi - Periodic Waveforms of Voltages and Currents". European Trans. on Electrical Power, Vol.6, NO.5, Sept./Oct., 1996, pp. 321 - 328.

M.Aredes, E.H.Watanabe. "New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters". IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 10, NO.3 July, pp. 1649-1656, 1995.

M.Takeda, K. Ikeda, A. Teramoto, T. Aritsuka. "Harmonic Current and Reactive Power Compensation with an Active power Filter". IEEE/PESC, pp.1174-1178,1988.

N. Nanaumi , S.Kuramoti , and M.Yano . "Comparision of Versatile Harmonics Current Compensation and Specific Harmonics Number Current Compensation" . Conf. Rec. of Japan IAS , pp.407-410 , 1996.

R. Hartley, K. Welles. "Recursive Computation of the Fourier Transform". IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems , Vol.3 , 1990 , pp. 1792 -1795.

S. Bernard, G. Trochain. "Second Generation of High Power Active Harmonic Conditioner based on the Current Injection Mode". ICHQP Conf. Rec., Oct. 16-18, 1996, pp.225-234.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การพิจารณาสัญญาณขาออกที่ได้จากการคำนวณ Recursive DFT เมื่อใช้ Sliding Basis แบบ A

เราจะทำการพิสูจน์ว่า เมื่อสัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณรายคาบเวลาไม่ต่อเนื่องที่มีคาบเวลาเท่ากับคาบเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณ DFT การคำนวณ Recursive DFT 1 คาบ โดยใช้ Sliding Basis แบบ A ตามสมการที่ (3.6) จะได้สัญญาณขาออกเป็นสัญญาณฮาร์มอนิกในอันดับที่ต้องการโดยตรง พิจารณาสัญญาณกระแส

$$i(k) = \sum_{h'=-\infty}^{\infty} I_{h'} W^{h'k} = \sum_{h'=-\infty}^{\infty} i_{h'}(k) \tag{ก.1}$$

เมื่อ h' คืออันดับของฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแส k คือดัชนีเวลาไม่ต่อเนื่อง ทำการคำนวณ Recursive DFT เพื่อหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ h จะได้ดังนี้

$$I_h(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(k-n) \cdot W^{hn} \tag{ก.2}$$

แทนค่า i(k) ในสมการ (ก.1) ลงในสมการ (ก.2) จะได้ว่า

$$I_h(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{h'=-\infty}^{\infty} I_{h'} W^{h'(k-n)} \right) W^{hn}$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{h'=-\infty}^{\infty} \left(\sum_{n=0}^{N-1} I_{h'} W^{h'k} W^{(h-h')n} \right)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{h'=-\infty}^{\infty} \left\{ I_{h'} W^{h'k} \left(\sum_{n=0}^{N-1} W^{(h-h')n} \right) \right\} \tag{ก.3}$$

เนื่องจากเทอมใน (•) ของสมการ (ก.3) จะมีค่าเป็น 0 เสมอยกเว้นเฉพาะในกรณีที่ h' = h ดังนั้นเรา จะได้ว่า

$$I_h(k) = \frac{1}{N} I_h W^{hk} \sum_{n=0}^{N-1} W^0$$

$$= I_h W^{hk} = i_h(k) \qquad (ก.4)$$

ค่า $I_h(k)$ ที่คำนวณได้จะเป็นสัญญาณฮาร์มอนิกอันดับที่ h ณ เวลา k คือ $i_h(k)$ ตรงตามต้องการ

ภาคผนวก ข

การพิสูจน์สมการ Recursive ของการทำ DFT แบบเต็มคาบ

ในที่นี้เราจะทำการพิสูจน์ว่าการทำ DFT แบบเต็มคาบโดยใช้ Sliding Basis ตามสมการที่ (3.6) สามารถเขียนเป็นสมการ Recursive ได้ดังสมการที่ (3.8) เริ่มจากพิจารณาสมการที่ (3.6)

$$\begin{aligned} I_h(k) &= \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} i(k-n)\cdot W^{hn} \\ &= \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N-1} i(k-n)\cdot W^{hn} + \frac{1}{N} i(k) \end{aligned} \tag{3.6}$$

เมื่อแทนค่า k ด้วย k-1 ลงในสมการ (3.6) จะได้

$$I_h(k-1) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} i(k-n-1)\cdot W^{hn} \tag{ข.1}$$

แทนค่า m = n+1 จะได้

$$I_h(k-1) = \frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N} i(k-m)\cdot W^{hm} W^{-h} \tag{ข.2}$$

คูณทั้งสองข้างของสมการ (ข.1) ด้วย W^h และแยกพจน์ของ $i(k-m)$ เมื่อ m=N ออกมาจะได้

$$W^h I_h(k-1) = \frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N-1} i(k-m)\cdot W^{hm} + \frac{1}{N} i(k-N)\cdot W^{hN} \tag{ข.3}$$

ดังนั้นจากสมการ (3.6) และ (ก.3) เราจะได้ว่า

$$I_h(k) = \frac{1}{N} i(k) + W^h I_h(k-1) - \frac{1}{N} i(k-N)\cdot W^{hN} \tag{ข.4}$$

โดยการแทนค่า $W^{hN} = e^{j\frac{2\pi}{N}hN} = 1$ และจัดรูปเราจะได้ว่า

$$I_h(k) = W^h I_h(k-1) + \frac{1}{N}(i(k) - i(k-N)) \qquad (ข.5)$$

ซึ่งตรงกับสมการที่ (3.8)

การพิสูจน์สมการ Recursive ของการทำ DFT แบบ 1/6 คาบ

ในกรณีของการทำ DFT แบบ 1/6 คาบโดยใช้ Sliding Basis ตามสมการที่ (3.12) ซึ่งเขียนเป็นสมการ Recursive ได้ดังสมการที่ (3.13) เราสามารถพิสูจน์ได้ในทำนองเดียวกันคือ

$$\begin{aligned} I_{6h}(k) &= \frac{6}{N}\sum_{n=0}^{\frac{N}{6}-1} i(k-n)\cdot W^{hn} \\ &= \frac{6}{N}\sum_{n=1}^{\frac{N}{6}-1} i(k-n)\cdot W^{hn} + \frac{6}{N}i(k) \end{aligned} \qquad (3.12)$$

พิจารณา

$$I_{6h}(k-1) = \frac{6}{N}\sum_{n=0}^{\frac{N}{6}-1} i(k-n-1)\cdot W^{hn} \qquad (ข.6)$$

แทนค่า m = n+1 จะได้

$$I_{6h}(k-1) = \frac{6}{N}\sum_{m=1}^{\frac{N}{6}} i(k-m)\cdot W^{hm}W^{-h} \qquad (ข.7)$$

คูณทั้งสองข้างของสมการ (ข.1) ด้วย W^h และแยกพจน์ของ $i(k-m)$ เมื่อ m=N/6 ออกมาจะได้

$$W^h I_{6h}(k-1) = \frac{6}{N}\sum_{m=1}^{\frac{N}{6}-1} i(k-m)\cdot W^{hm} + \frac{6}{N} i(k-\frac{N}{6})\cdot W^{h\frac{N}{6}} \qquad (ข.8)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.12) และ (ข.8) เราจะได้ว่า

$$I_{6h}(k) = \frac{6}{N} i(k) + W^h I_{6h}(k-1) - \frac{6}{N} i(k-\frac{N}{6})\cdot W^{h\frac{N}{6}} \qquad (ข.9)$$

โดยการแทนค่า $W^{h\frac{N}{6}} = e^{j\frac{2\pi}{N}h\frac{N}{6}} = e^{j\frac{\pi}{3}h}$ และจัดรูปเราจะได้ว่า

$$I_{6h}(k) = W^h I_{6h}(k-1) + \frac{6}{N}(i(k) - e^{j\frac{\pi}{3}h} i(k-\frac{N}{6})) \qquad (ข.10)$$

ซึ่งตรงกับสมการที่ (3.13)

ภาคผนวก ค

การพิจารณาฟังก์ชันโอนย้ายบนแกนหมุนใน z-Domain

ในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเมื่อพิจารณาเป็นสเปซเวกเตอร์บนแกนนิ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DFT ที่ได้กับกระแสขาเข้าคือ

$$I_h(z) = D_h(z) \cdot i(z) \qquad (ค.1)$$

และเมื่อพิจารณาบนแกนหมุนของ W^{hk} เมื่อ k คือดัชนีเวลาไม่ต่อเนื่อง สัญญาณ $I_h(z)$ และ $i(z)$ จะเปลี่ยนไปเป็น $I_h'(z)$ และ $i'(z)$ ตามลำดับโดยที่

$$I_h'(z) = Z[W^{-hk} I_h(k)] \;\; , \;\; i'(z) = Z[W^{-hk} i(k)]$$

และฟังก์ชันโอนย้ายบนแกนหมุนเป็นไปตามสมการ

$$I_h'(z) = D_h'(z) \cdot i'(z) \qquad (ค.2)$$

จากทฤษฎีบทของผลการแปลง Z ที่ว่า

ถ้า $Z[x(k)] = X(z)$ แล้ว $Z[a^k x(k)] = X(a^{-1}z)$

เมื่อประยุกต์ใช้กับสมการที่ (ค.1) โดยพิจารณา W^{-h} เป็น a และ $I_h(k)$ เป็น $x(k)$ เราจะได้ว่า

ถ้า $Z[I_h(k)] = D_h(z) \cdot Z[i(k)]$

แล้ว $Z[W^{-hk} I_h(k)] = \left\{ D_h(z) \cdot Z[i(k)] \right\}_{z \Rightarrow W^h z}$

$$Z[I_h'(k)] = D_h(W^h z) \cdot Z[W^{-hk} i(k)]$$

$$Z[I'_h(k)] = D_h(W^h z) \cdot Z[i'(k)] \tag{ค.3}$$

ดังนั้นเราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันโอนย้ายบนแกนนิ่งและแกนหมุนคือ

$$D'_h(z) = D_h(W^h z) \tag{ค.4}$$

และในทางกลับกัน

$$D_h(z) = D'_h(W^{-h} z) \tag{ค.5}$$

เมื่อเราประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (ค.4) กับฟังก์ชันโอนย้ายในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วย Recursive DFT แบบต่างๆจะได้ผลดังนี้คือ

<u>กรณีใช้กรอบข้อมูล 1 คาบ</u>

$$D'_h(z) = \frac{1}{N} \frac{1-(W^h z)^{-N}}{1-W^h (W^h z)^{-1}}$$

จาก $W^{hN} = 1$ เราจะได้ว่า

$$D'_h(z) = \frac{1}{N} \frac{1-z^{-N}}{1-z^{-1}} \tag{ค.6}$$

<u>กรณีใช้กรอบข้อมูล 1/6 คาบ</u>

$$D'_{6h}(z) = \frac{6}{N} \frac{1-e^{j\frac{\pi}{3}h}(W^h z)^{-\frac{N}{6}}}{1-W^h (W^h z)^{-1}}$$

พิจารณา

$$e^{j\frac{\pi}{3}h} W^{-h\frac{N}{6}} = e^{j\frac{\pi}{3}h} e^{-j\frac{2\pi}{N}h\frac{N}{6}} = 1$$

ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$D'_{6h}(z) = \frac{6}{N} \frac{1-z^{-N}}{1-z^{-1}} \tag{ค.7}$$

ภาคผนวก ง

การพิจารณาลักษณะของผลตอบสภาวะชั่วครู่ของการตรวจจับฮาร์มอนิก ด้วย Recursive DFT เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น

เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดแบบขั้น กระแสองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เราต้องการตรวจจับก็จะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมปลิจูดเป็นแบบขั้นด้วย ถ้าเราพิจารณากระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุนของฮาร์มอนิกความถี่นั้นๆ สัญญาณฮาร์มอนิกที่เราพิจารณาก็จะกลายเป็นสัญญาณไฟตรง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นของกระแสฮาร์มอนิกบนแกนนิ่งก็จะกลายเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นของสัญญาณไฟตรงบนแกนหมุนหรือมีลักษณะเป็นขั้นบันไดนั่นเอง ซึ่งลักษณะของผลตอบต่อสัญญาณขั้นบันไดบนแกนหมุนนี้ก็จะสะท้อนถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแอมปลิจูดของสัญญาณบนแกนนิ่ง เมื่อเราพิจารณาผลตอบต่อสัญญาณขั้นบันไดของฟังก์ชันโอนย้ายบนแกนหมุนในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วย Recursive DFT ตามสมการที่ (ง.1) (ดูภาคผนวก ค)

$$D_h'(z) = \frac{I_h'(z)}{i'(z)} = \frac{1}{N}\frac{1-z^{-N}}{1-z^{-1}} \qquad (ง.1)$$

สมการที่ (ง.1) สามารถเขียนเป็นสมการผลต่างเชิงเลขซึ่งมีลักษณะเป็นสูตร Recursive ได้ดังสมการที่ (ง.2)

$$I_h'(k) = I_h'(k-1) + \frac{1}{N}(i'(k) - i'(k-N)) \qquad (ง.2)$$

เมื่อให้ $i'(k)$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นจากค่า C1 ไปเป็น C2 ที่จุดเวลา k = 0 เราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} i'(k) - i'(k-N) &= C2 - C1 = C3 && \text{เมื่อ } k < N \\ &= 0 && \text{เมื่อ } k \geq N \end{aligned}$$

แทนค่าคงตัวในสมการ (ง.2) เราจะได้ว่า

เมื่อ $k < N$

$$
\begin{aligned}
I'_h(k) &= I'_h(k-1) + \frac{C3}{N} \\
&= C1 + \frac{C3}{N}(k+1)
\end{aligned}
\qquad (ง.3)
$$

เมื่อ $k \geq N$

$$
I'_h(k) = I'_h(k-1) \qquad (ง.4)
$$

สมการ (ง.3) และ (ง.4) ตีความได้ว่าตั้งแต่จุดเวลาที่ k = 0 ค่าสัญญาณขาออก $I'_h(k)$ จะเพิ่มค่าอย่างเป็นเชิงเส้นด้วยความชันเท่ากับ $\frac{C3}{N}$ ต่อจุด จนกระทั่งถึงจุดเวลาที่ k = N สัญญาณขาออกจึงจะมีค่าเท่ากับค่าสุดท้ายคือ C2 และจะคงที่ต่อไป ซึ่งเมื่อเราตีความบนแกนนิ่งก็คือเมื่อแอมปลิจูดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น สัญญาณฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมปลิจูดเป็นเส้นตรงจนเข้าสู่ค่าสุดท้ายภายในเวลา 1 คาบ และสำหรับกรณีที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกแบบ Recursive DFT แบบ 1/6 คาบเราก็สามารถพิจารณาได้ในลักษณะเดียวกัน

ประวัติผู้เขียน

นายสันต์ ศรีอรรฆ์ธำรง เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2519 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุทัยธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2538 และ ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539