



IMPROVING COMPUTING EFFICIENCY IN ELECTRIC POWER MEASUREMENT USING GOERTZEL ALGORITHM

Nguyen Thanh Hai, Le Thi Thuy Nga*

University of Transport and Communications, No. 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 26/11/2020

Revised: 20/12/2020

Accepted: 28/12/2020

Published online: 15/2/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.2.1>

* *Corresponding author*

Email: lethuynga@utc.edu.vn; Tel: 0987065998

Abstract. A study on the power consumption monitoring in order to find out an energy saving solution is an important topic which has been interested by many scientists. In this study, the Goertzel algorithm is used to analyze the current and voltage signals of the load, followed by the power and electric consumption on the load calculations. By using Goertzel algorithm, number of calculation was reduced, which is suitable for vary of microprocessors. Theoretical studies were verified by simulation by Matlab software and a tested device using STM32F103C8T6 microprocessor. Moreover, the power consumption values measured from the tested device are approximate to those obtained from a commercial equipment of Esy Logic PM-2100 (Schneider Electric).

Keywords: measure power consumption, Goertzel algorithm, power control and monitoring.

© 2021 University of Transport and Communications



NÂNG CAO HIỆU NĂNG TÍNH TOÁN TRONG BÀI TOÁN ĐO NĂNG LƯỢNG ĐIỆN SỬ DỤNG THUẬT TOÁN GOERTZEL

Nguyễn Thanh Hải, Lê Thị Thúy Nga*

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 26/11/2020

Ngày nhận bài sửa: 20/12/2020

Ngày chấp nhận đăng: 28/12/2020

Ngày xuất bản Online: 15/2/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.2.1>

* Tác giả liên hệ

Email: lethuynga@utc.edu.vn; Tel: 0987065998

Tóm tắt. Nghiên cứu tìm ra giải pháp tiết kiệm năng lượng đang là vấn đề được rất nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng thuật toán Goertzel để phân tích tín hiệu dòng điện và điện áp cấp cho tải, trên cơ sở đó tính ra công suất và điện năng tiêu thụ của tải. Việc sử dụng thuật toán Goertzel giúp làm giảm số phép tính nên phù hợp với nhiều dòng vi xử lý. Các nghiên cứu lý thuyết được kiểm chứng bằng mô phỏng bởi phần mềm Matlab và mô hình thiết bị thực sử dụng vi xử lý STM32F103C8T6. Hơn nữa, thực nghiệm đo công suất tiêu thụ một số tải cho thấy kết quả sử dụng thiết bị thử nghiệm tiệm cận với kết quả đo từ thiết bị thương mại Schneider Electric PM-2100.

Từ khóa: đo công suất tiêu thụ, thuật toán Goertzel, điều khiển và giám sát điện năng.

© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đo năng lượng điện ở Việt Nam được thực hiện rất phổ biến từ các cơ quan xí nghiệp đến từng hộ dân. Nhiều doanh nghiệp đã chế tạo và cung cấp các thiết bị đo điện năng với cấp chính xác theo các tiêu chuẩn hiện hành. Tuy nhiên, với mục tiêu đánh giá chi phí năng lượng của một hộ gia đình hay doanh nghiệp có sử dụng các thiết bị có công suất khác nhau, cần nhiều bộ đo năng lượng gắn với từng thiết bị. Dẫn đến giá thành của hệ thống khá lớn và khả năng kiểm soát năng lượng cho từng thiết bị hạn chế. Với sự phát triển của công nghệ IoT cho phép kết nối dữ liệu từ nhiều nút mạng trong cùng nhà máy hay hộ gia đình, người sử dụng có thể quản lý và giám sát năng lượng của từng thiết bị. Nhờ đó phát hiện ra các bất thường và có

giải pháp lựa chọn các thiết bị điện phù hợp hơn về mặt tiết kiệm năng lượng. Do phải sử dụng một số lượng lớn, các thiết bị đo năng lượng nên phải có giá thành hợp lý và các chỉ tiêu kỹ thuật khác với các công tơ điện tử hiện tại [1, 2] đang được sử dụng phổ biến.

Với phương pháp đo năng lượng như ở công trình [3, 4], cho phép xác định chính xác công suất hiệu dụng và năng lượng sử dụng biến đổi Fourier nhanh FFT, tuy nhiên không phù hợp cho các Chip vi xử lý giá thành rẻ. Để sử dụng các dạng Chip này cần có giải pháp nâng cao hiệu năng của chúng bằng cách tối ưu thuật toán giảm khối lượng tính toán. Thuật toán Goertzel đã được ứng dụng rất hiệu quả để xác định tần số trong điện thoại quay số DTMF [5] nhờ phân tích phổ tín hiệu để biết được phím nào được ấn, với bài toán này sử dụng tần số lấy mẫu là 8KHz với số lần lấy mẫu là 205. Tại chương 4 của tài liệu [6] so sánh khối lượng tính toán và thời gian tính toán khi thực hiện FFT và thuật toán Goertzel, cho thấy với thuật toán Goertzel cho phép giảm khối lượng tính toán khi phân tích phổ tín hiệu.

Trong công trình [7] đề xuất ứng dụng thuật toán Goertzel để kiểm tra dòng điện xoay sử dụng Chip FPGA. Trong [8] đưa ra phương pháp phân tích phổ tín hiệu ứng dụng trên vi xử lý của hãng ST Microelectronics cho thấy khả năng áp dụng trên mạch thực.

Tóm lại, ứng dụng thuật toán Goertzel trong bài toán đo công suất và năng lượng điện chưa được công bố nhiều đặc biệt tại Việt Nam. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất giải pháp sử dụng thuật toán Goertzel để phân tích tín hiệu dòng điện và điện áp, trên cơ sở đó tính công suất và điện năng tiêu thụ của tải. Phương pháp tính toán công suất và năng lượng được tích hợp vào phần mềm nạp cho vi xử lý trong mạch chế tạo thử nghiệm, ngoài ra nó còn có khả năng kết nối với các thiết bị như Smartphone để quản lý và giám sát từ xa.

2. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN NĂNG LƯỢNG ĐIỆN

2.1. Điện áp một pha sóng sin

Điện áp tức thời của lưới điện có dạng:

$$v = \sqrt{2} V \sin \omega t \quad (\text{V}) \quad (1)$$

trong đó: V là giá trị điện áp hiệu dụng của lưới điện

$\omega = 2\pi f$ là tần số góc của điện áp (rad/s)

f là tần số điện áp lưới điện (Hz)

t là thời gian (s)

Gọi φ là góc lệch pha giữa điện áp và dòng điện qua tải, nếu dòng điện chậm pha hơn so với điện áp thì biểu thức của dòng tức thời qua tải $i(t)$ được xác định theo (2):

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) \quad (\text{A}) \quad (2)$$

trong đó: I là giá trị hiệu dụng của dòng tải.

Theo tiêu chuẩn IEEE Std 1459-2010 [9] thì giá trị công suất tiêu thụ tức thời của tải p:

$$p = vi = \sqrt{2} V \sin \omega t \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi)$$

$$\Rightarrow p = VI \cos \varphi [1 - \cos(2\omega t)] - VI \sin \varphi \sin(2\omega t) \quad (3)$$

Đặt: $P = VI \cos \varphi; Q = VI \sin \varphi$ (4)

Công suất biểu kiến: $S = VI$ (5)

Ta có: $p = p_a + p_q$ (6)

trong đó: $p_a = P [1 - \cos(2\omega t)]$ (7)

$$p_q = -Q \sin(2\omega t) \quad (8)$$

Thành phần p_a là công suất hiệu dụng tạo nên tiêu hao năng lượng w_a trên tải:

$$w_a = \int_{t_0}^t p_a dt = P(t - t_0) - \frac{P}{2\omega} [\sin(2\omega t) - \sin(2\omega t_0)] \quad (9)$$

Từ (7) nhận thấy: Công suất hiệu dụng gồm 2 thành phần, P là công suất thực (hay công suất tích cực) và công suất nội tại $-P \cos(2\omega t)$. Công suất nội tại thể hiện quá trình truyền năng lượng cho tải, thành phần dao động này không làm mất công suất chung của điện lưới.

Thành phần p_q là công suất phản kháng tạo nên năng lượng phản kháng w_q :

$$w_q = \int_{t_0}^t p_q dt = -\frac{Q}{2\omega} [\cos(2\omega t) - \cos(2\omega t_0)] \quad (10)$$

Như vậy các đại lượng cần tính toán là: công suất hiệu dụng P, công suất phản kháng Q và hệ số công suất: $PF = \frac{P}{S} = \cos \varphi$ (11)

2.2. Điện áp một pha sóng không sin

Trong quá trình làm việc của hệ thống điện, có thể tạo ra các tín hiệu điện áp có sóng hài bậc cao trộn vào nguồn điện có tần số cơ bản, làm cho điện áp lưới có dạng không sin, giá trị điện áp lưới được xác định theo công thức:

$$v = v_1 + v_H \quad (12)$$

Trong đó: v_1 là điện áp sóng hài cơ bản $v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1)$ (13)

v_H là điện áp sóng hài bậc cao $v_H = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h)$ (14)

Tương tự có giá trị dòng điện qua tải:

$$i = i_1 + i_H = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) + I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (15)$$

Giá trị hiệu dụng của điện áp: $V = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_T^{T+kT} v^2 dt}$ (16)

Giá trị hiệu dụng của dòng điện: $I = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_T^{T+kT} i^2 dt}$ (17)

Theo [10] thì giá trị công suất được tính theo công thức:

$$P = P_a + P_q \quad (18)$$

Với:

$$P_a = V_0 I_0 + \sum_h V_h I_h \cos \varphi_h [1 - \cos(2h\omega t - 2\alpha_h)] \quad (19)$$

$$P_q = -\sum_h V_h I_h \sin \varphi_h \sin(2h\omega t - 2\alpha_h) + 2 \sum_n \sum_{m \neq n} V_m I_n \sin(m\omega t - \alpha_m) \sin(n\omega t - \beta_n) + \sqrt{2} V_0 \sum_h I_h \sin(h\omega t - \beta_h) + \sqrt{2} I_0 \sum_h V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (20)$$

$\varphi_h = \beta_h - \alpha_h$: được gọi là góc lệch pha giữa điện áp và dòng điện sóng hài thứ h

Công suất hiệu dụng thành phần sóng hài cơ bản: $P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$ (21)

Công suất hiệu dụng thành phần không phải sóng hài cơ bản:

$$P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \varphi_h \quad (22)$$

Công suất biểu kiến sóng hài cơ bản: $S_1 = V_1 I_1$ (23)

Công suất biểu kiến không phải sóng hài cơ bản: $S_H = \sqrt{S^2 - S_1^2}$ (24)

Công suất phản kháng: $N = \sqrt{S^2 - P^2}$ (25)

Hệ số công suất sóng hài cơ bản:

$$PF_1 = \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (26)$$

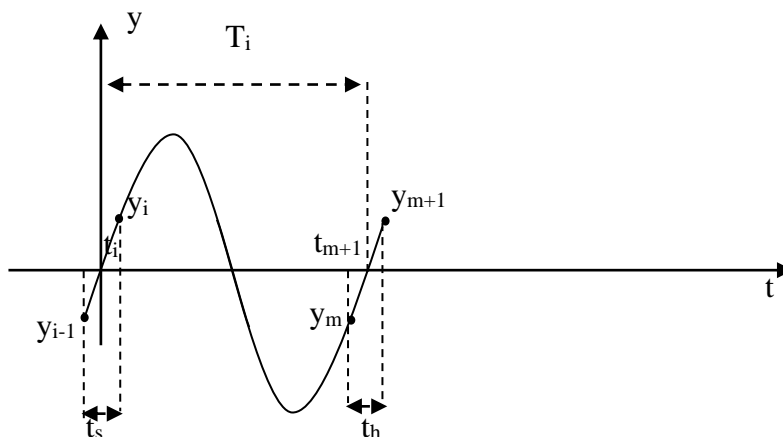
Hệ số công suất: $PF = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_H^2}}$ (27)

2.3 Thực hiện thuật toán đo năng lượng trên chip xử lý tín hiệu số

Các tham số cần xác định đối với bộ đo năng lượng gồm: điện áp hiệu dụng (V), dòng điện hiệu dụng (A), công suất hiệu dụng (W), năng lượng tiêu thụ trên tải (Wh) và hệ số công suất.

Để tính toán các đại lượng này đầu tiên cần phải rời rạc hóa tín hiệu điện áp và dòng điện tức thời bằng bộ ADC với thời gian trích mẫu lựa chọn trước (T_s).

Theo phương pháp truyền thống [3], sử dụng thuật toán xác định điểm 0 để tính góc lệch pha giữa điện áp và dòng điện



Hình 1. Đồ thị xác định điểm 0 của tín hiệu điều hòa.

Chu kỳ thực tế của tín hiệu: $T_i = m_A T_s$

Số lần lấy mẫu quy đổi:

$$m_A = m + \frac{|y_i|}{|y_i| + |y_{i-1}|} + \frac{|y_m|}{|y_m| + |y_{m+1}|} \quad (28)$$

Trong công thức (28):

m là tổng số lần lấy mẫu trong một chu kỳ tín hiệu, với chu kỳ lấy mẫu T_s (m là số nguyên)

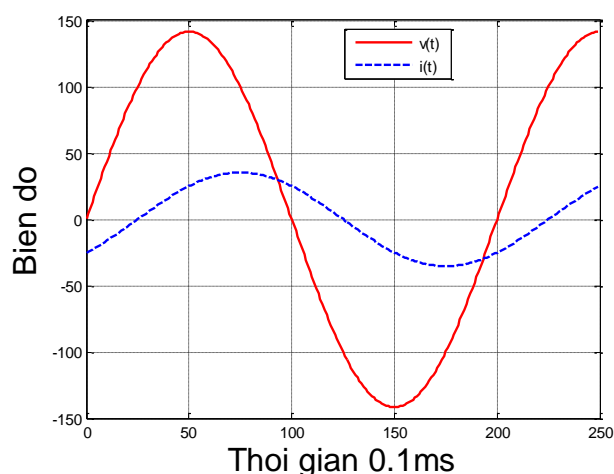
m_A là số lần lấy mẫu quy đổi, được hiệu chỉnh từ m . Do chu kỳ thực tế của tín hiệu không là bội số của chu kỳ lấy mẫu T_s nên m_A là số thập phân.

y_{i-1}, y_m là biên độ của tín hiệu trước khi qua điểm 0

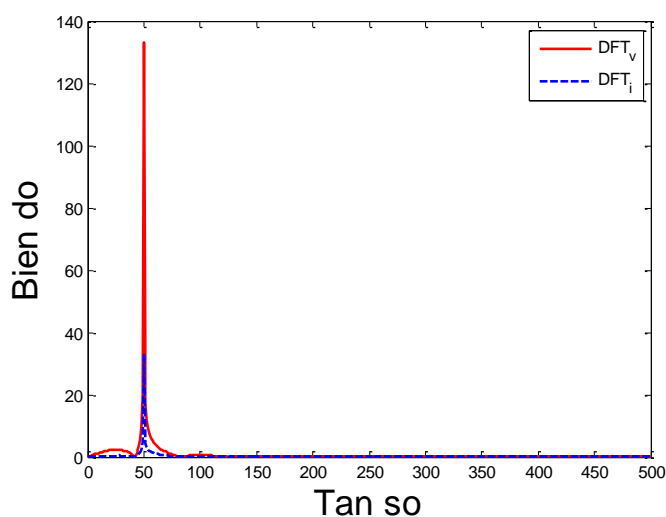
y_i, y_{m+1} là biên độ của tín hiệu sau khi qua điểm 0.

Nhờ công thức (28) có thể xác định được chu kỳ tín hiệu và thời điểm tín hiệu đi qua điểm 0 chính xác hơn.

Sử dụng biến đổi Fourier nhanh FFT trong khoảng thời gian T_i xác định biên độ và pha của các sóng hài của tín hiệu dòng điện và điện áp.



Hình 2. Tín hiệu điện áp và dòng điện.



Hình 3. Đặc tính tần số sử dụng FFT.

Tương ứng với các tần số sóng hài xác định được giá trị hiệu dụng của điện áp và dòng điện theo các công thức (16) và (17). Công suất hiệu dụng được tính theo (21) và (22), hệ số công suất được tính theo (27).

Giá trị năng lượng tiêu thụ: $E_i = E_{i-1} + P_i T_s$

Trong đó: P_i là công suất hiệu dụng của bước tính thứ i , E_{i-1} là năng lượng của bước tính trước đó.

2.4 Ứng dụng thuật toán Goertzel trong bài toán đo năng lượng

Thuật toán được Goertzel đưa ra để tính thành phần thứ k DFT của tín hiệu $\{x[n]\}$ với chiều dài N :

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad \text{với } k=0, 1, \dots, N-1 \quad (29)$$

Coi giá trị $X[k]$ là tích chập của tín hiệu $x[n]$ và $h_k[n]$:

$$Y_k[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{j2\pi k \frac{m-n}{N}} h_k[m-n] \quad (30)$$

Như vậy: $Y_k(N) = X[k]$

Như vậy thay bằng việc tính công thức (29) để tìm ra phổ tín hiệu thì tính đáp ứng ra của hệ thống tuyến tính IIR với đáp ứng xung $\{h_k[n]\}$ ở công thức (30).

Để thuận tiện cho việc giải bài toán này, chuyển đổi sang miền z có:

$$H_k(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_k[n] z^{-n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{j2\pi k \frac{n}{N}} u[n] z^{-n} = \sum_{n=0}^{\infty} e^{j2\pi k \frac{n}{N}} z^{-n} \quad (31)$$

Biến đổi z ngược ta có phương trình sai phân:

$$Y_k[n] = x[n] + e^{j\frac{2\pi k}{N}} Y_k[n-1] \quad \text{với } Y_k[-1] = 0 \quad (32)$$

Đặt biến trung gian:
$$S(z) = \frac{X(z)}{1 - 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)z^{-1} + z^{-2}} \quad (33)$$

Sau một vài phép biến đổi ta có:

$$H_k[z] = \frac{Y_k(z)}{X(z)} = \frac{Y_k(z)}{S(z)} \frac{S(z)}{X(z)} = \left(1 - e^{-j\frac{2\pi k}{N}}\right) z^{-1} \frac{1}{1 - 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)z^{-1} + z^{-2}} \quad (34)$$

Như vậy để tính $Y_k[n]$ cần thực hiện qua 2 bước:

- Tính $S[n] = x[n] + 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)S[n-1] - S[n-2]$ (35)

- Tính $Y_k[n] = S[n] - e^{-j\frac{2\pi k}{N}} S[n-1]$ (36)

Với các điều kiện $S[-2] = S[-1] = 0$

Lúc này thuật toán (36) không hồi quy, giá trị của $Y_k[n]$ không cần tính theo giá trị $Y_k[n-1]$ trước đó.

Do $X[k] = Y_k[n] = S[n] - e^{-j\frac{2\pi k}{N}} S[n-1]$ nên để tính $X[k]$ chỉ cần thực hiện phép nhân với $e^{-j\frac{2\pi k}{N}}$ một lần duy nhất, khác với (32) là phải thực hiện phép nhân với số phức $e^{-j\frac{2\pi k}{N}}$ với N lần, vì vậy giảm các bước tính toán cho vi xử lý, tăng tốc độ tính toán cho hệ thống.

So sánh về khối lượng cần tính toán giữa FFT và Goertzel thể hiện ở bảng 1 [9].

Bảng 1. Bảng so sánh số phép tính giữa phương pháp FFT và Goertzel.

Phương pháp	Số phép tính nhân số thực	Số phép tính cộng số thực	Số phép tính lượng giác
FFT	$4N^2$	$4N^2$	$2N^2$
Goertzel	$2N^2+2N$	$4N^2$	$2N$

Ta thấy khi sử dụng Goertzel số phép tính lượng giác giảm đi đáng kể.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỬ NGHIỆM

3.1 Kết quả mô phỏng

Các kịch bản mô phỏng được thực hiện như sau: tính điện áp hiệu dụng, dòng điện hiệu dụng, công suất hiệu dụng và hệ số công suất qua tải với các trường hợp điện áp cấp nguồn là sóng sin, sóng không sin (có hài bậc cao) với các dạng tải khác nhau (thuần trở, có cảm kháng, tải phức hợp gồm cả thuần trở, cảm kháng và tụ điện).

Tiến hành thực hiện mô phỏng theo lưu đồ gồm 7 bước như sau:

- *Bước 1:* Chọn tần số trích mẫu tín hiệu $F_s=10\text{Khz}$, rời rạc tín hiệu điện áp và dòng điện đầu vào.

- *Bước 2:* Lựa chọn tần số cần phân tích phổ tại các điểm lân cận với tần số điện lưới (hài cơ bản) và hài bậc cao của nó.

- *Bước 3:* Sử dụng thuật toán (35) (36) phân tích phổ, vẽ đồ thị và xác định phần thực và phần ảo của tín hiệu điện áp và dòng điện tại các tần số lựa chọn ở bước 2.

- *Bước 4:* Khôi phục tín hiệu điện áp và dòng điện (công thức (12),(15)) ở dạng tín hiệu điều hòa tương ứng với các sóng hài khi sử dụng các dữ liệu ở bước 3.

- *Bước 5:* Xác định góc lệch pha giữa các tín hiệu điện áp và dòng điện tại các tần số sóng hài.

- *Bước 6:* Tính điện áp và dòng điện hiệu dụng (công thức (16), (17)).

- *Bước 7:* Tính công suất hiệu dụng của từng sóng hài (công thức (21),(22)) và công suất hiệu dụng tổng.

Sử dụng phần mềm mô phỏng Matlab 2014a thực hiện 2 phương pháp tính công suất: Phương pháp 1 theo truyền thống - xác định chu kỳ theo (28) và phương pháp 2 sử dụng thuật toán Goertzel (36) để phân tích phổ sóng hài tín hiệu dòng điện và điện áp qua tải và tính công suất theo công thức (21), (22). Xét các trường hợp sau:

- *Trường hợp 1:* Đưa điện áp sóng sin $v(t) = \sqrt{2}100\sin(2\pi 50t)$ vào mạch có cảm kháng nhận được dòng điện tải $i(t) = \sqrt{2}25\sin(2\pi 50t - \frac{\pi}{4})$.

- Tính toán theo phương pháp 1:

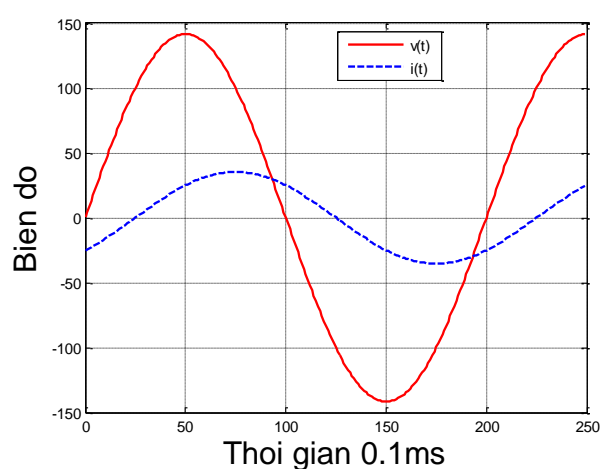
Giá trị hiệu dụng:
$$V = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v^2(i)}$$

trong đó: N là số lần trích mẫu tín hiệu trong 1 chu kỳ.

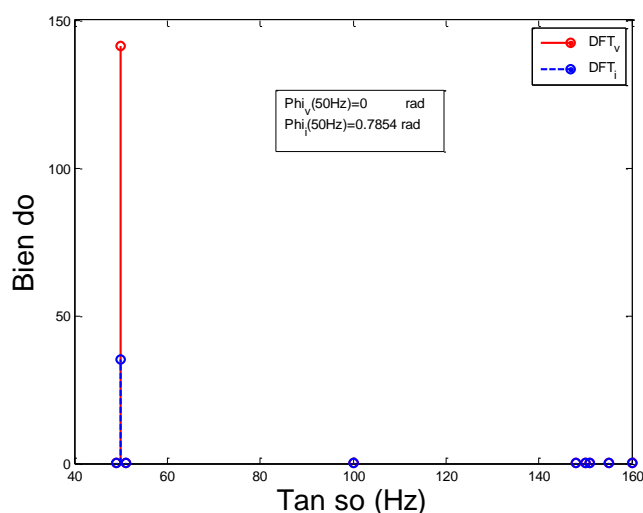
Tính độ lệch pha giữa tín hiệu dòng điện và điện áp bằng phương pháp xác định khoảng thời gian tín hiệu điện áp và dòng điện qua điểm 0 (công thức 28).

$$\varphi = \frac{2\pi\lambda}{N}$$
 với λ là số lần trích mẫu giữa thời điểm điện áp qua điểm không và dòng điện qua điểm không.

Công suất hiệu dụng được tính: $P=VI\cos(\varphi)$



Hình 4. Tín hiệu điện áp và dòng điện sóng sin.



Hình 5. Đặc tính tần số sóng sin.

- Tính toán theo phương pháp 2: Phân tích phổ tín hiệu điện áp và dòng điện.

Áp dụng công thức (21) và (22) để tính công suất hiệu dụng. Kết quả cho thấy tín hiệu dòng điện và điện áp của đặc tính tần số ở hình 5 trùng với tín hiệu đầu vào, do đó công suất

hiệu dụng tính bằng phương pháp 1 và phương pháp 2 bằng nhau ($P=1767,8W$). Như vậy với trường hợp tải thuần trở (góc lệch pha giữa dòng điện và điện áp bằng 0) kết quả của 2 phương pháp là như nhau.

- Trường hợp 2: Khi có tác động nhiễu Gauss vào nguồn cấp:

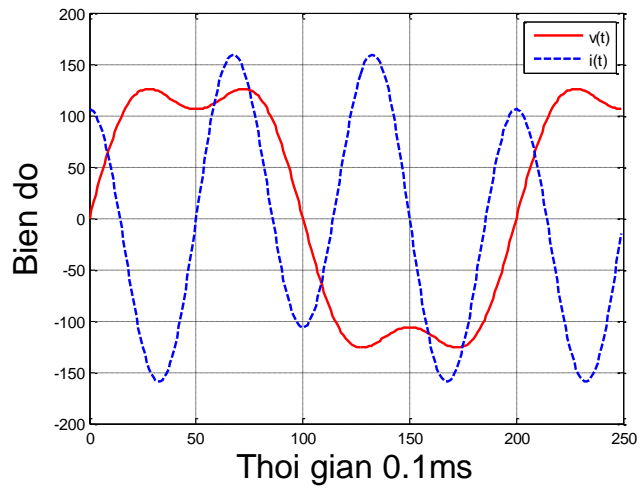
$$v(t) = \sqrt{2}100\sin(2\pi 50t) + 2\text{randn}(\text{size}(t))$$

Công suất hiệu dụng theo phương pháp 1 là 1762,8W (lệch 0,28% so với khi không có nhiễu), trong khi với phương pháp 2 là 1768,2 W (lệch 0,022%).

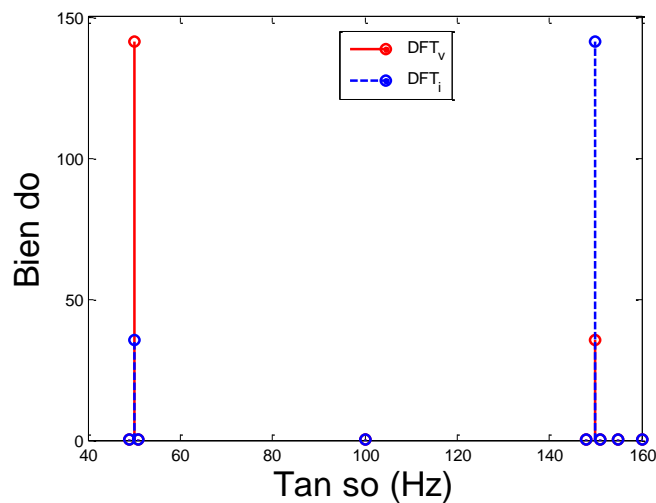
- Trường hợp 3: Đưa điện áp sóng không sin cấp cho tải

$$v(t) = \sqrt{2} [100\sin(2\pi 50t) + 25\sin(2\pi 150t)]$$

nhận được dòng điện tải: $i(t) = \sqrt{2} \left[25\sin(2\pi 50t - \frac{\pi}{2}) + 100\sin(2\pi 150t + \frac{\pi}{2}) \right]$



Hình 6. Tín hiệu điện áp và dòng điện không sin.



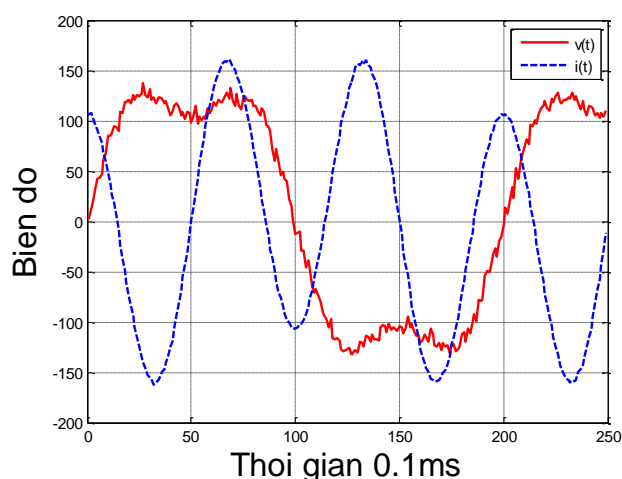
Hình 7. Phổ tín hiệu sóng không sin.

Tương tự như trên sử dụng phương pháp 1 tính $P= 9466,9W$, $V_{rms}=103V$, $I_{rms}=103A$ và

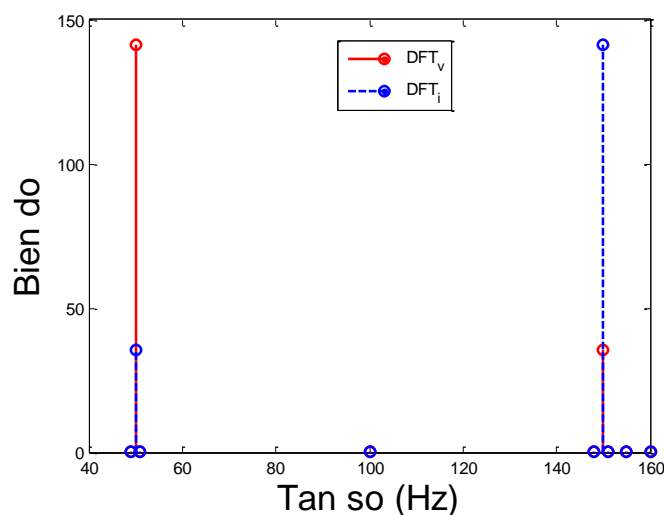
$\theta=0,048$ rad và theo phương pháp 2 là $P=0$ W, $V_{rms}(50\text{Hz})=100\text{V}$, $I_{rms}(50\text{Hz})=25\text{A}$ và $\varphi(50\text{Hz})=1,5708\text{rad}$, $V_{rms}(150\text{Hz})=24,93\text{V}$, $I_{rms}(50\text{Hz})=100,24\text{A}$ và $\varphi(50\text{Hz})=-1,5708\text{rad}$. Ở đây có sự khác biệt lớn giữa 2 phương pháp, do tải có cả thành phần điện cảm và tụ điện (không có điện trở thuần) nên công suất được trả về lưới như vậy phương pháp 2 cho kết quả chính xác còn đối với phương pháp 1 do không tính được góc lệch pha giữa dòng điện và điện áp đối với từng phổ sóng hài nên kết quả hoàn toàn không đúng.

Như vậy phương pháp 1 không thể áp dụng cho trường hợp điện áp không sin với tải không phải thuần trở.

- Trường hợp 4: Khi bổ xung tác động nhiễu Gauss vào nguồn cấp có điện áp không sin.



Hình 8. Tín hiệu điện áp và dòng điện sóng không sin có nhiễu.



Hình 9. Phổ tín hiệu sóng không sin có nhiễu.

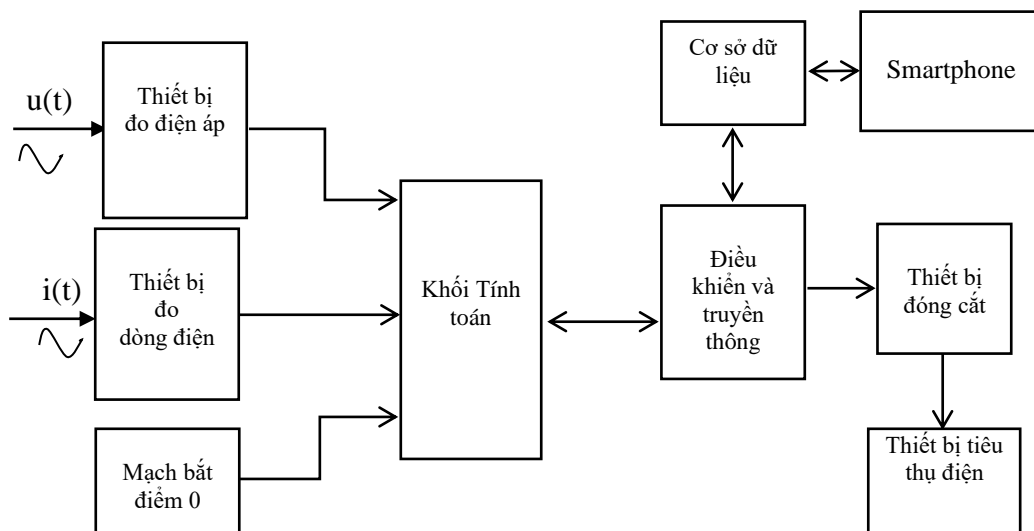
Phương pháp 1 tính $P=9467\text{W}$, $V_{rms}=103\text{V}$, $I_{rms}=103\text{A}$ và $\varphi=0,048$ rad và theo phương pháp 2 là $P=4,48$ W, $V_{rms}(50\text{Hz})=100\text{V}$, $I_{rms}(50\text{Hz})=25\text{A}$ và $\varphi(50\text{Hz})=1,5701\text{rad}$, $V_{rms}(150\text{Hz})=24,93\text{V}$, $I_{rms}(50\text{Hz})=100,23\text{A}$ và $\varphi(50\text{Hz})=-1,5707\text{rad}$.

Như vậy nhiễu làm sai lệch công suất hiệu dụng là $4,48\text{W}$.

3.2. Kết quả thử nghiệm

Cấu trúc bộ thiết bị đo lường và giám sát điện năng trong nghiên cứu này được thể hiện trên hình 10. Chức năng của các khối trong hình 10 như sau:

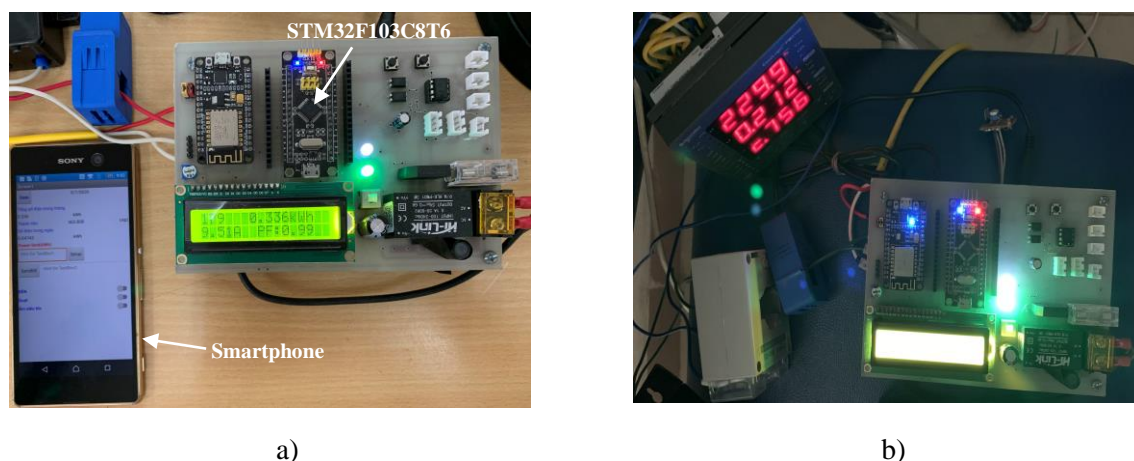
- Khối thiết bị đo điện áp: có nhiệm vụ đo giá trị tức thời, rời rạc hóa điện áp xoay chiều.
- Khối thiết bị đo dòng điện: có nhiệm vụ đo giá trị tức thời, rời rạc hóa dòng điện xoay chiều.
- Mạch bắt điểm 0: Đo góc lệch pha giữa điện áp và dòng điện trên tải, từ đó tính ra hệ số công suất $\cos\varphi$.
- Khối Tính toán: nhận tín hiệu từ các thiết bị đo điện áp, dòng điện, góc lệch pha giữa điện áp và dòng điện sau đó tính toán giá trị công suất tiêu thụ, cuối cùng là truyền dữ liệu với Khối điều khiển và truyền thông. Thuật toán Goertzel được cài đặt và tính toán cho vi xử lý STM32F103C8T6.
- Khối điều khiển và truyền thông: là khối kết nối giữa các thiết bị đo và tính toán với thiết bị Smartphone thông qua WiFi, đồng thời khối này cũng làm nhiệm vụ ra lệnh đóng/ngắt các thiết bị tiêu thụ điện.
- Khối cơ sở dữ liệu: truyền nhận và lưu dữ liệu của hệ thống trên cloud đồng thời đóng vai trò trung gian để kết nối giữa thiết bị giám sát (Smartphone) với thiết bị điều khiển.
- Khối thiết bị đóng cắt: đóng cắt dòng điện cung cấp cho Thiết bị tiêu thụ điện.
- Thiết bị tiêu thụ điện: gồm các thiết bị dân dụng như đèn chiếu sáng, quạt,...



Hình 10. Sơ đồ cấu trúc bộ thiết bị đo lường công suất.

Để đánh giá thời gian thực hiện thuật toán Goertzel trên Chip vi xử lý STM32F103C8T6 ta căn cứ vào bảng 1. Với tốc độ xử lý 50 MIPS thời gian tính lệnh nhân và lệnh cộng là $0,02\mu s$ và hàm lượng giác (\cos) là $20\mu s$. Chọn số lần trích mẫu $N=200$, từ bảng 1 với phương pháp FFT cần thời gian 1,6s còn với thuật toán Goertzel cần thời gian xấp xỉ là 12ms.

Một số hình ảnh thử nghiệm bộ thiết bị đo điện năng tiêu thụ được thể hiện trên hình 11.



Hình 11. a) Bộ thiết bị đo điện năng; b) Kết hợp Bộ thiết bị đo điện năng và thiết bị đa năng PM – 2100 của hãng Schneider (Pháp).

Bảng 2. Bảng so sánh giá trị công suất đo được giữa thiết bị đo điện năng và thiết bị thương mại PM-2100.

Loại tải	Lần đo	Công suất đo được bằng thiết bị PM-2100 (KW)	Công suất đo được bằng thiết bị đo điện năng (KW)	Độ chênh lệch giữa 2 thiết bị đo (KW)
Bóng đèn sợi đốt 200W	1	0,1230	0,1248	0,0018
	2	0,1230	0,1238	0,0008
	3	0,1230	0,1245	0,0015
Quạt cây 45W	1	0,0350	0,0359	0,0009
	2	0,0350	0,0351	0,0001
	3	0,0350	0,0348	0,0002
Ấm đun nước siêu tốc 1500W	1	1,4930	1,5034	0,0104
	2	1,4930	1,5059	0,0129
	3	1,4930	1,5074	0,0114
Tải tổng hợp	1	1,6330	1,6789	0,0459
	2	1,6330	1,6795	0,0465
	3	1,6330	1,6782	0,0452

Từ bảng 2 nhận thấy: So với thiết bị PM – 2100 đã được thương mại hóa của hãng Schneider (Pháp) thì thiết bị được chế tạo có sai số đo lớn nhất là 2,85% (tương ứng với tải tổng hợp), giá trị sai số này nằm trong giới hạn chấp nhận được của Tiêu chuẩn đo lường quốc gia là dưới 5%.

4. KẾT LUẬN

Việc tính toán công suất hiệu dụng và năng lượng tiêu thụ với hệ thống điện có sóng hài bậc cao cần phân tích phổ tín hiệu, nếu sử dụng biến đổi Fourier nhanh FFT cần khối lượng tính toán lớn trên vi xử lý không đảm bảo thời gian thực trên các thiết bị có giá thành thấp. Với

hệ thống điện lưới, giá trị biến động của tần số nằm trong phạm vi lân cận tần số cơ bản (50Hz, và hài bậc cao của 50Hz) nên thay bằng việc sử dụng FFT để xác định phổ trên toàn dải chỉ cần xác định đặc tính tần số ở các điểm lân cận này.

Trong trường hợp này sử dụng thuật toán Goertzel cho phép giảm khối lượng tính toán (công thức 35, 36). Các kết quả mô phỏng và thử nghiệm trên thiết bị thực cho thấy đảm bảo độ chính xác của kết quả đo với các dạng điện áp khác nhau cũng như tải khác nhau.

Các nghiên cứu tiếp theo hướng tới bài toán đo công suất của hệ thống điện lưới 3 pha.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2020-DT-005.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Analog Device Eneerig IC with Autocalibration ADE915A, Technical Support 2018.
- [2]. K. Gandhi, H. O. Bansal, Smart Metering in Electric Power Distribution System, International Conference on Control, Automation, Robotics and Embedded System, 2013.
- [3]. Y. Chen, J. Lan, Implementation of Power Measurement System with Fourier Series and Zero-Crossing Algorithm, International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2014.
- [4]. L.S. Czarnecki, Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents, *Electrical Engineering*, 80 (1997) 359-367. <https://doi.org/10.1007/BF01232925>
- [5]. Texas Instrument, Modified Goertzel Algorithm in DTMF Detection Using the TMS320C80, Digital Signal Processing Solutions, 1996.
- [6]. C. Sidney Burrus, Fast Fourier Transforms. Textbook of LibreTexts libraries, Rice University, 2020.
- [7]. M. Kekelj, N. Bulic, V. Sucic, An FPGA Implementation of the Goertzel Algorithm in a Non-Destructive Eddy Current Testing, International Conference on Signals and Systems, 2017, pp. 180-184. <https://doi.org/10.1109/ICSIGSYS.2017.7967036>
- [8]. A. Vitali, The Goertzel algorithm to compute individual terms of the discrete Fourier transform (DFT), Design tip DT 0089, ST Microelectronics 2017.
- [9]. S. Nuccio, A. Catallotti, IEEE Standard: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Std 1459-2010, February 2010.
- [10]. J. L. Willems, The IEEE standard 1459: What and why?, IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, 2010.