

NHẬN DẠNG CÁC HIỆN TƯỢNG NHIỀU LOẠN CHẤT LƯỢNG ĐIỆN NĂNG BẰNG SỬ DỤNG BIẾN ĐỔI WAVELET RỜI RẠC KẾT HỢP VỚI PHÂN TÍCH RMS

IDENTIFICATION OF POWER QUALITY DISTURBANCES BY USING DISCRETE WAVELET TRANSFORMATION AND RMS ANALYSIS

Võ Tiến Dũng, Nguyễn Khắc Tuấn, Nguyễn Anh Tuấn, Ngô Thị Lê

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

tdungtmv@gmail.com, khactuanktv@gmail.com, tuanna2579@gmail.com, ngothile@gmail.com

Tóm tắt - Bài viết tập trung vào vấn đề phát hiện và phân loại các loại nhiễu loạn chất lượng điện năng. Các nhiễu loạn này bao gồm sụt áp, quá điện áp ngắn hạn, gián đoạn tạm thời, quá độ, sóng hài, nhấp nháy và nhiễu. Để phân loại các loại nhiễu loạn chúng tôi sử dụng kết hợp kỹ thuật biến đổi Wavelet rời rạc với phân tích RMS. Một hệ thống quy tắc để phân loại nhiễu chất lượng điện năng cũng được phát triển, trong đó một cơ sở tri thức được tạo ra bằng cách sử dụng một bộ quy tắc dưới dạng kiến thức chuyên môn từ phân tích chi tiết về các tính năng được trích xuất. Kết quả mô phỏng cho thấy, chúng ta có thể phát hiện và xác định các loại nhiễu loạn một cách nhanh chóng và chính xác bằng phương pháp này.

Từ khóa - Phân loại; chất lượng điện năng; phân tích RMS; biến đổi Wavelet

Abstract - This paper focuses on power quality event, detection and classification of power quality disturbances (PQD). The disturbance of interest includes sag, swell, interruption, transient, harmonics, flicker and noise. In order to classify the power disturbances, we use the combination of discrete Wavelet transformation and RMS (Root Mean Square) analysis. A rule-based system for power quality disturbance classification is also developed in which the knowledge base is composed using a set of rules in the form of expertise knowledge from a detailed analysis of the extracted features. The simulation results show that, we can detect and identify disturbance quickly and accurately with this method.

Key words - Classification; Power quality; Root Mean Square (RMS) analysis; Wavelet Transform

1. Đặt vấn đề

Thuật ngữ chất lượng điện năng (CLĐN) chỉ mới xuất hiện từ cuối những năm 1980 nhưng ngày càng trở nên quan trọng với cả khách hàng tiêu thụ điện và bên sản xuất điện. Các vấn đề về chất lượng điện năng liên quan đến các hiện tượng về tần số, điện áp và dòng điện có thể gây ra sự cố hay hoạt động bất thường của các thiết bị sử dụng điện. Các hiện tượng nhiễu loạn chất lượng điện năng điển hình như sụt áp, quá áp ngắn hạn (Voltage sag, swell), gián đoạn điện áp (Interruption), nhấp nháy (flicker), nhiễu (noise), sóng hài (harmonic)... có thể gây ra hư hỏng thiết bị hay sự tác động sai của thiết bị bảo vệ dẫn đến gián đoạn cung cấp điện làm thiệt hại lớn về kinh tế. Để nâng cao CLĐN, nguồn gây nên nhiễu loạn điện năng cần được nhận dạng và phân loại nhằm có lập hóa hoặc giảm thiểu ảnh hưởng của nó.

Đã có nhiều công trình nghiên cứu về các phương pháp nhận dạng các hiện tượng nhiễu loạn CLĐN trên cơ sở phân tích tín hiệu đầu vào [1-10]. Các phương pháp thông thường bao gồm phân tích RMS, biến đổi Fourier, biến đổi Wavelet. Các kỹ thuật phức tạp khác cũng được ứng dụng để phân tích tín hiệu, bao gồm sử dụng phép biến đổi S, biến đổi Hilbert (Hilbert Transform), mạng nơ ron nhân tạo (ANN- Artificial Neural Network), Fuzzy logic (FLS- Fuzzy logic system), SVMs (Support vector machines), FES (Fuzzy Expert System) ... Mỗi phương pháp có ưu, nhược điểm và phạm vi ứng dụng riêng, không có phương pháp nào là vạn năng có thể nhận dạng tất cả các loại nhiễu loạn. Tuy nhiên, nhìn chung các phương pháp đó rất phức tạp và do đó khó ứng dụng trong điều kiện thực tế.

Bài viết này giới thiệu phương pháp đơn giản hơn để nhận dạng và phân loại các hiện tượng nhiễu loạn bằng cách kết hợp kỹ thuật biến đổi Wavelet rời rạc (DWT- Discrete Wavelet Transform) và phân tích RMS. Tín hiệu

nhiều loạn được đưa vào phân tích Wavelet bằng MATLAB. Nghiên cứu sẽ thuyết phục hơn nếu sử dụng dạng sóng từ hệ thống điện thực, tuy nhiên do chưa có điều kiện thu thập dữ liệu nên bài viết sử dụng tín hiệu nhiễu từ kết quả mô phỏng. Để kết quả có tính thuyết phục, tín hiệu nhiễu không lấy từ các hàm số lí tưởng như một số nghiên cứu [1-7] hoặc từ mô phỏng bằng phần mềm MATLAB/SIMULINK. Để khách quan, việc mô phỏng sẽ được thực hiện bằng phần mềm khác. Phần mềm EMTP/ ATP được lựa chọn để mô phỏng các hiện tượng nhiễu loạn trong lưới trung áp vì ưu điểm về mô phỏng các quá trình điện từ gần với hệ thống vận hành thực.

2. Tóm tắt các kỹ thuật xử lý tín hiệu để phát hiện nhiễu loạn điện năng

2.1. Phân tích RMS

Phân tích RMS, hay tiếng Việt thường gọi là giá trị hiệu dụng. Giá trị RMS được xác định theo công thức:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (1)$$

Trong đó, N là số trích mẫu trong mỗi chu kỳ và v_i là điện áp tức thời trên miền thời gian tương ứng.

Giá trị hiệu dụng thường được sử dụng rộng rãi trong kỹ thuật điện vì nó dễ dàng mô tả một số hiện tượng đơn giản của điện áp trong khoảng thời gian dài. Lợi thế lớn của kỹ thuật này là sự đơn giản, tốc độ phân tích nhanh và yêu cầu ít bộ nhớ. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của nó là thời gian lấy mẫu cũng như sự không phân biệt tần số, sóng hài hoặc các thành phần nhiễu.

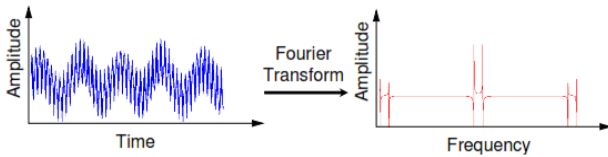
2.2. Biến đổi Fourier (FT- Fourier Transforms)

Phép biến đổi Fourier của tín hiệu $g(t)$ và biến đổi ngược được xác định bởi công thức sau:

$$F\{g(t)\} = G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2)$$

$$F^{-1}\{G(f)\} = g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{j2\pi ft} df \quad (3)$$

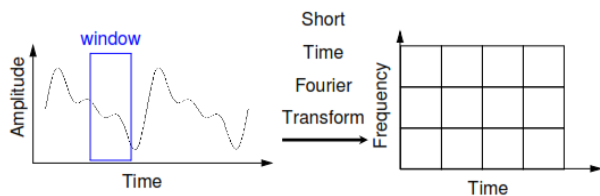
Biến đổi Fourier thường được sử dụng trong phân tích sóng hài. FT biến đổi từ miền thời gian sang miền tần số (Hình 1). Với phép biến đổi này có thể đánh giá được biên độ các sóng hài cơ bản với độ chính xác cao. Nó rất phù hợp để đánh giá các tín hiệu tuần hoàn ở trạng thái tĩnh. Dù vậy nó vẫn có hạn chế, khi biến đổi sang miền tần số, thông tin thời gian đã mất. Nếu tín hiệu tĩnh thì nhược điểm trên không ảnh hưởng quan trọng. Tuy nhiên, chỉ sử dụng FT không đủ để đánh giá các trạng thái động hoặc tín hiệu không tuần hoàn.



Hình 1. Phép biến đổi Fourier

2.3. Biến đổi Fourier trong thời gian ngắn (STFT-Short Time Fourier Transform)

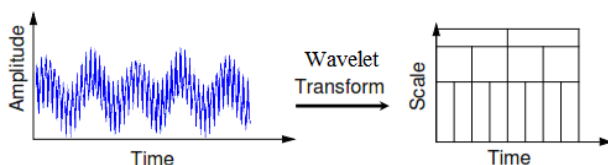
Trong trường hợp tín hiệu động, phân tích Fourier không phân tích được biến thiên tần số trong từng vùng theo thời gian của tín hiệu. Để khắc phục nhược điểm này, kỹ thuật được cải tiến thành biến đổi Fourier trong thời gian ngắn còn được gọi là biến đổi nhanh Fourier (FFT- Fast Fourier Transform) hoặc biến đổi Fourier cửa sổ (WFT- Window Fourier Transform). Trong đó, các nhiễu điện áp được phân tích trong miền tần số và dịch thời gian (Hình 2). Tuy nhiên, nhược điểm của nó là sử dụng tần số trong một khoảng thời gian ngắn nhưng lại dùng cho tất cả miền thời gian hoặc phải dò trên nhiều miền thời gian.



Hình 2. Phép biến đổi Fourier thời gian ngắn

Nhìn chung phép biến đổi Fourier chỉ cho khảo sát một trong hai miền là thời gian và tần số mà không thể cùng lúc khảo sát trong hai miền.

2.4. Phép biến đổi Wavelet (WT-Wavelet Transform)



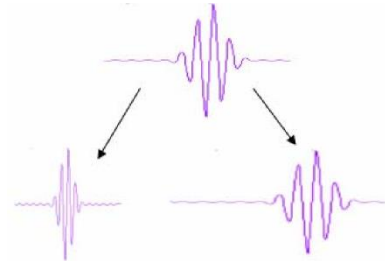
Hình 3. Phép biến đổi wavelet

Để khắc phục nhược điểm của biến đổi Fourier, năm 1975 nhà toán học Morlet phát triển phương pháp đa phân giải, trong đó sử dụng một xung dao động được gọi là "wavelet" (nghĩa là sóng nhỏ) cho thay đổi kích thước và

so sánh với tín hiệu ở từng giai đoạn riêng biệt (minh họa Hình 3, 4). Với một hàm wavelet mẹ $\psi(t)$, phép biến đổi tạo thành bằng cách thêm vào các hệ số tỉ lệ a (scale) và hệ số dịch chuyển b (shift) theo công thức sau:

$$\psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

Nếu $a < 1$ thì $\psi(a, b)$ là phiên bản nén của hàm wavelet mẹ tương ứng với thành phần tần số cao. Còn nếu $a > 1$, tức là $\psi(a, b)$ có độ rộng thời gian lớn hơn và tương ứng với miền tần số thấp. Do đó, biến đổi wavelet có độ rộng thời gian tương ứng với thành phần tần của chúng.



Hình 4. Các phiên bản co giãn từ wavelet mẹ

Phép biến đổi wavelet liên tục (CWT- Continuous Wavelet Transform) được tính như sau:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (5)$$

Với ψ^* là số phức liên hợp của ψ . Trong kỹ thuật thì phép biến đổi wavelet rời rạc (DWT- Discrete Wavelet Transform) được sử dụng nhiều hơn:

$$W(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(\frac{k - a_0^m n b_0}{a_0^m}\right) f(k) \quad (6)$$

Trong đó, m, n là số nguyên và $a = a_0^m$, $b = a_0^m \cdot n b_0$

2.5. Các kỹ thuật dựa trên trí tuệ nhân tạo

Một số phương pháp nhận dạng và phân loại CLĐN dựa trên trí tuệ nhân tạo (artificial intelligence- AI). Các phương pháp được sử dụng bao gồm phương pháp chuyên gia (expert systems), hệ thống phân loại mờ (fuzzy systems), mạng nơ ron nhân tạo (artificial neural networks) và SVM (support vector machines). Tài liệu [8] đã phân tích ưu, nhược điểm của cách tiếp cận này.

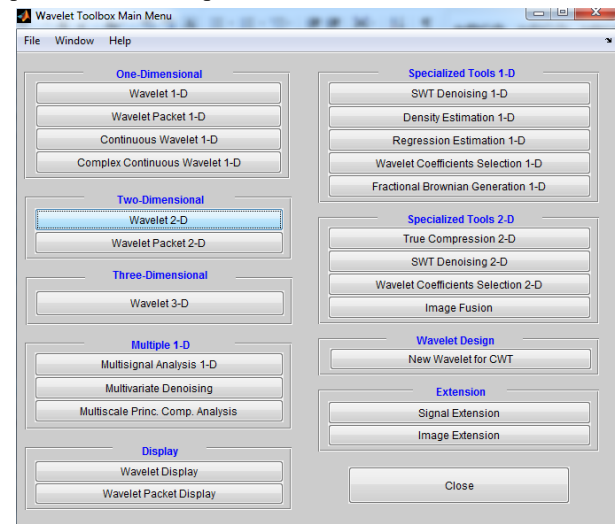
3. Ứng dụng biến đổi wavelet và phân tích RMS vào nhận dạng các hiện tượng nhiễu loạn điện năng

3.1. Ứng dụng Wavelet rời rạc để phân tích tín hiệu

Kỹ thuật biến đổi Wavelet trong thời gian thực được thực hiện bằng công cụ *Wavelet toolbox* trong phần mềm MATLAB. Giao diện của nó trên Hình 5. Tín hiệu vào được biến đổi về định dạng file *.mat rồi được đưa vào MATLAB để xử lý.

Việc lựa chọn họ Wavelet đóng vai trò quan trọng trong việc phát hiện và phân loại các nhiễu loạn CLĐN. Đối với nhiễu thoáng qua, họ Daubechies 4 và 6 (Db4 và Db6) là tốt hơn, còn nhiễu loạn chậm nhưng diễn ra trong thời gian dài, họ Daubechies 8 và 10 phù hợp hơn [1, 7, 8]. Trong

bài báo này nhóm tác giả sử dụng biến đổi wavelet Db6 và quan sát mức 5 để phân tích.



Hình 5. Giao diện của Wavelet Toolbox

Tần số cơ bản của lưới điện là 50 Hz. Phân tích wavelet phân tích 6 mức với các dải tần chi tiết được trình bày trong Bảng 1.

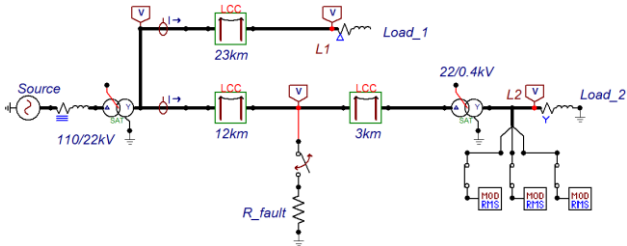
Bảng 1. Giải tần các mức phân tích Wavelet họ Db6

STT	Hệ số	Phạm vi tần số (Hz)
1	D1	5000-2500
2	D2	1250-2500
3	D3	625-1250
4	D4	312.5-625
5	D5	156-312.5
6	D6	78-156
7	A6	0-78

Quá trình nhận dạng các loại nhiễu được tiến hành như sau: Tín hiệu điện áp được ghi lại (chẳng hạn bằng máy ghi lỗi kỹ thuật số, digital fault recorders - DFR) và phân tích. Kết quả được so sánh với mẫu để phân loại CLĐN.

3.2. Mô phỏng các hiện tượng nhiễu loạn trong hệ thống điện

Để lấy tín hiệu phân tích, các loại nhiễu loạn được mô phỏng dựa trên hệ thống điện thực của Việt Nam với sơ đồ trên Hình 6 và thông số ở Bảng 2.



Hình 6. Sơ đồ một sợi hệ thống điện mô phỏng trong EMTP

Bảng 2. Thông số của hệ thống điện

STT	Phần tử	Thông số
1	Nguồn	250 MVA, 110 kV, 50 Hz
2	MBA 110/22 kV	25 MVA, D/Y0
3	MBA 22/0,4 kV	2000 kVA, D/Y0

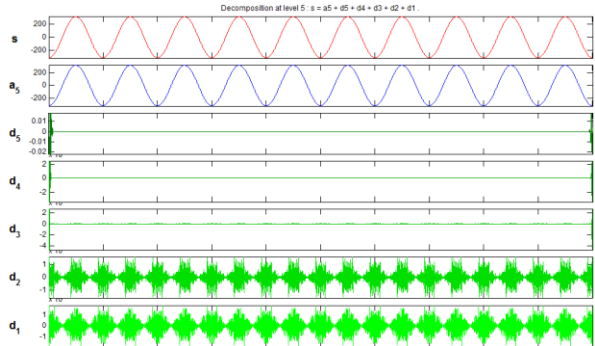
4	Đường dây trên không	AC70
5	Phụ tải phía 22 kV	1,58 MW và 1,02 MVar
6	Phụ tải phía 0,4 kV	1,24 MW và 0,86 MVar

Các loại nhiễu loạn CLĐN thường gặp được mô phỏng được phân chia thành 7 loại, bao gồm:

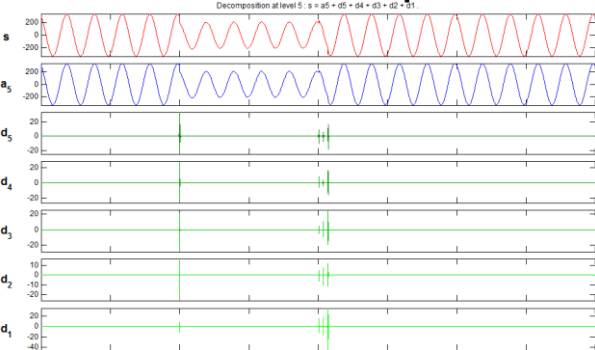
- Sụt áp ngắn hạn (Sag).
- Tăng áp ngắn hạn (Swell).
- Gián đoạn điện áp (Interruption).
- Quá độ (Transient).
- Sóng hài (Harmonic).
- Điện áp nhấp nháy (flicker).
- Điện áp bị nhiễu (noise).

Chi tiết của các mô phỏng này đã được trình bày trong các bài viết khác [11-13].

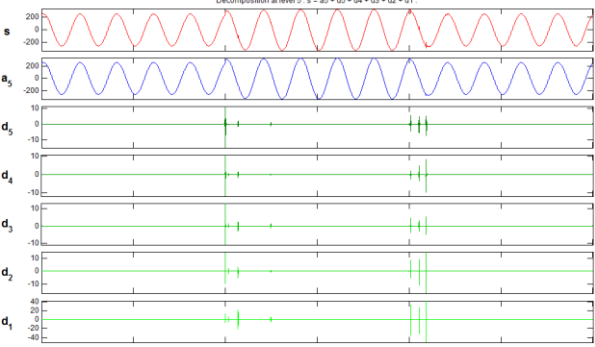
3.3. Kết quả biến đổi Wavelet rời rạc của các loại nhiễu loạn CLĐN



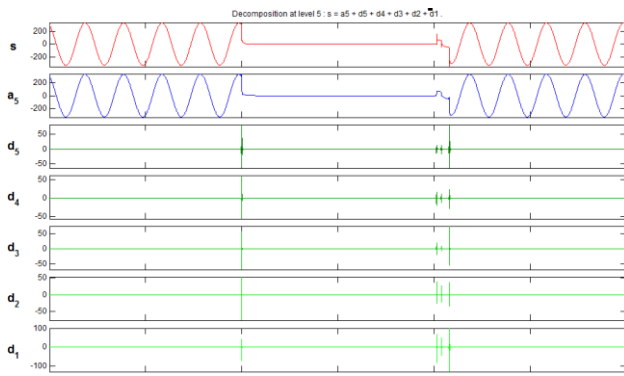
Hình 7. Phân tích Wavelet họ Db6 của hàm sin chuẩn



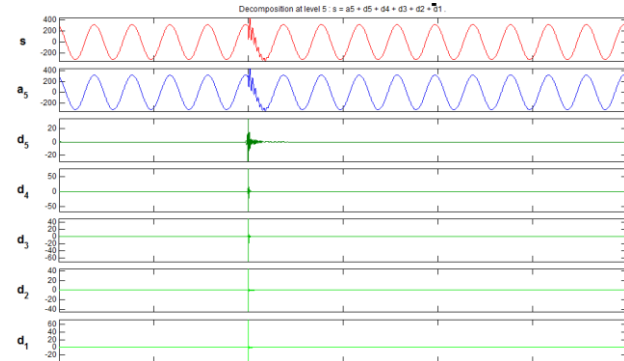
Hình 8. Phân tích Wavelet họ Db6 của hiện tượng sụt áp ngắn hạn (sag)



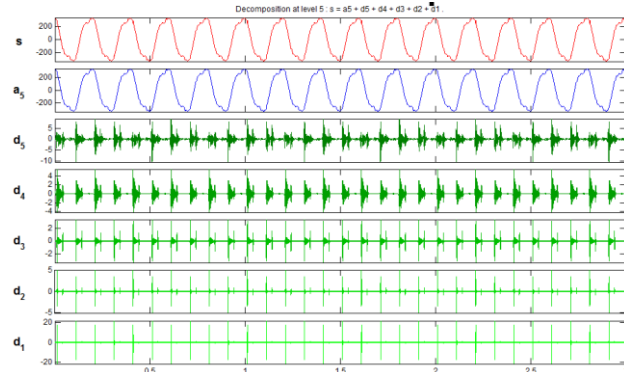
Hình 9. Phân tích Wavelet họ Db6 của hiện tượng quá điện áp ngắn hạn (swell)



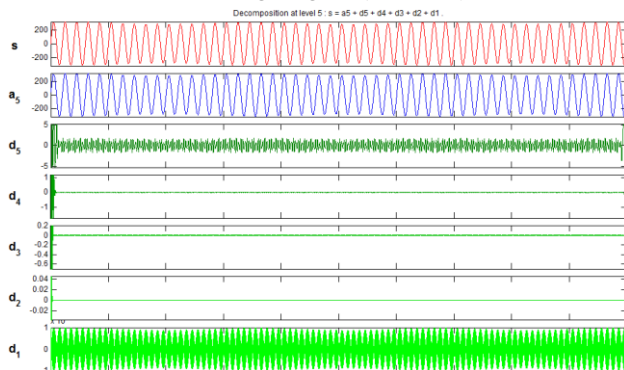
Hình 10. Phân tích Wavelet họ Db6 của hiện tượng gián đoạn tạm thời (interruption)



Hình 11. Phân tích Wavelet họ Db6 của hiện tượng quá độ (transient)



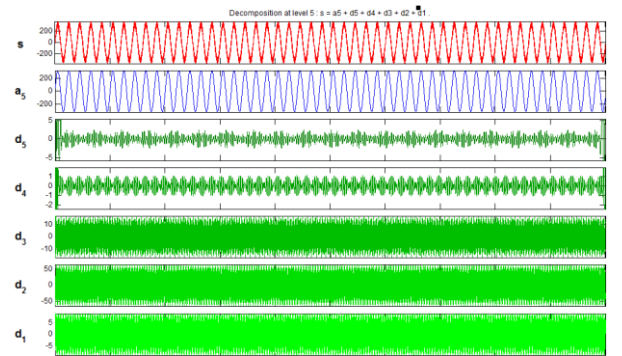
Hình 12. Phân tích Wavelet họ Db6 của hiện tượng sóng hài (harmonic)



Hình 13. Phân tích Wavelet họ Db6 của hiện tượng nhấp nháy (flicker)

Tín hiệu nhiễu loạn điện áp được đưa vào phân tích Wavelet với họ Daubechies 6. Kết quả thể hiện trên từ Hình 8 đến Hình 14, so sánh với phân tích từ hàm sin chuẩn

ở Hình 7.



Hình 14. Phân tích Wavelet họ Db6 của hiện tượng nhiễu (noise)

4. Đề xuất nhận dạng các loại nhiễu loạn CLĐN bằng biến đổi wavelet kết hợp với phân tích RMS

Quan sát Hình 8 đến Hình 14, về mặt trực quan, sử dụng biến đổi wavelet có thể nhận dạng hầu hết các loại nhiễu loạn CLĐN, ngoại trừ sụt áp, quá áp và gián đoạn điện áp rất khó phân biệt.

Tuy nhiên, để nhận dạng rõ ràng các loại tín hiệu, ta cần phải lượng hóa các giá trị đo lường, tính toán được. Để nhận dạng, phân loại các loại nhiễu loạn CLĐN, lấy ý tưởng từ phương pháp chuyên gia trong [9, 14], từ kết quả phân tích Wavelet, kết hợp với phân tích RMS, xây dựng các chỉ số sau:

$$F_1 = \frac{RMS(s)}{Normal} \quad (7)$$

Trong đó, s là tín hiệu đầu vào, Normal là giá trị làm việc định mức.

Đây chính là tỉ số giữa giá trị hiệu dụng của tín hiệu điện áp đầu vào với giá trị điện áp làm việc định mức.

$$F_2 = \frac{\max(d_5) - RMS(d_5)}{RMS(d_5)} \quad (8)$$

Trong đó, $\max(d_5)$ là giá trị cực đại của cấp độ 5 trong phân tích Wavelet của điện áp đầu vào.

Tương tự ta có chỉ số:

$$F_3 = \frac{\max(d_1) - RMS(d_1)}{RMS(d_1)} \quad (9)$$

$$F_4 = \frac{RMS(d_1)}{RMS(s)} \quad (10)$$

Để thiết lập một hệ thống dựa trên quy tắc phục vụ cho việc phân loại nhiễu loạn CLĐN, một cơ sở tri thức được tạo ra bằng cách sử dụng một bộ quy tắc dưới dạng kiến thức chuyên môn rút ra từ các phân tích chi tiết về đường đặc tính của các loại nhiễu. Bộ quy tắc đã được hình thành cho mục đích phân loại nhiễu loạn CLĐN như sau:

- + Gián đoạn điện áp (Interruption): Nếu $F_1 < 0,1$;
- + Sụt áp ngắn hạn (Sag): Nếu $0,1 < F_1 < 0,9$;
- + Tăng áp ngắn hạn (Swell): Nếu $F_1 > 1,1$;
- + Quá độ (Transient): Nếu $F_2 > 20$;
- + Sóng hài (Harmonic): Nếu $F_2 < 20$ và $F_3 > 10$;
- + Điện áp nhấp nháy (Flicker): Nếu $F_2 < 20$, $F_3 < 10$

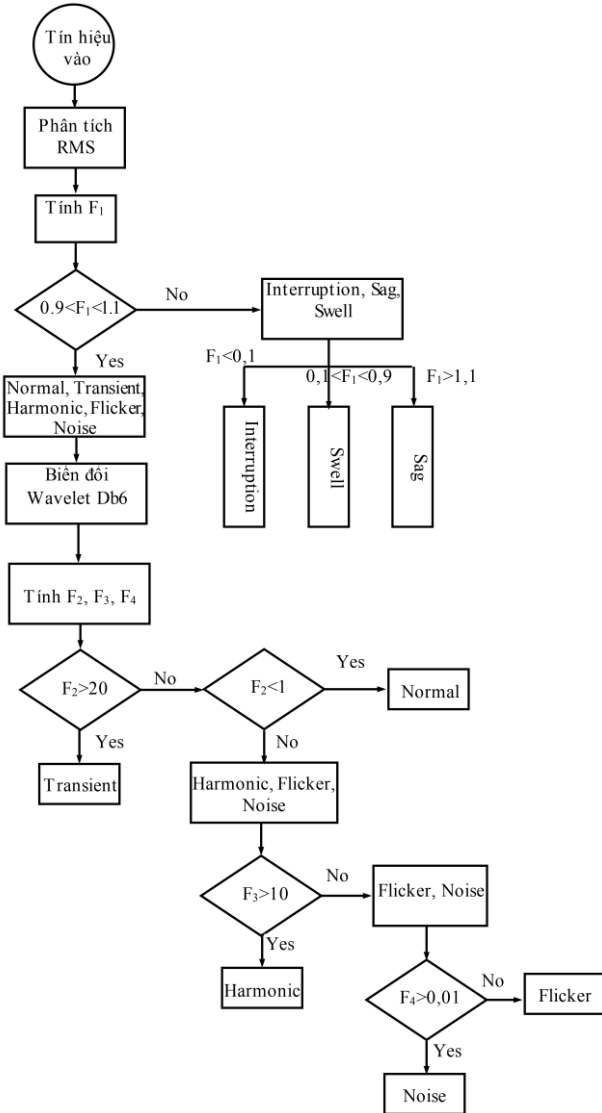
và $F_4 < 0,01$;

+ Điện áp bị nhiễu (Noise): Nếu $F_2 < 20$, $F_3 < 10$ và $F_4 > 0,01$;

+ Điện áp bình thường (Normal): Nếu $0,9 < F_1 < 1,1$ và $F_2 < 1$.

Việc phân loại được thể hiện rõ trên Hình 15.

Như vậy, việc các tín hiệu được xử lý và định lượng chính xác nên có thể nhận dạng và phân loại qua phân tích dữ liệu.



Hình 15. Sơ đồ cây phân loại các hiện tượng nhiễu loạn CLĐN

5. Kết quả và thảo luận

Bằng cách thay đổi các thông số của hệ thống điện trong sơ đồ Hình 6, 150 tín hiệu điện áp từ kết quả mô phỏng trong phần mềm EMTP được đưa ra phân tích và xử lý. Tín hiệu được đưa vào MATLAB phân tích RMS và biến đổi Wavelet họ Daubechies 6 với 5 mức.

Kết quả thử nghiệm được thể hiện ở Bảng 3. Kết quả cho thấy, sự chính xác của phương pháp đề xuất. Tuy nhiên, trong thực tế, các hiện tượng nhiễu loạn có thể xuất hiện cùng một lúc, chẳng hạn sụt áp ngắn hạn với sóng hài,

quá áp ngắn hạn với nhiễu ... Do đó, cần tiếp tục mở rộng nghiên cứu cho nhiều trường hợp hơn.

Bảng 3. Thông số của hệ thống điện

Loại	Số lượng	Chính xác	Sai	Tỷ lệ (%)
Normal	10	10	0	100
Interruption	20	20	0	100
Sag	20	20	0	100
Swell	20	20	0	100
Transient	20	20	0	100
Harmonic	20	20	0	100
Flicker	20	19	1	95
Noise	20	19	1	95
Tổng	150	148	2	

6. Kết luận

Bài viết đã trình bày một giải pháp sử dụng phép biến đổi Wavelet rời rạc kết hợp với phân tích RMS để nhận dạng và phân loại nhiễu loạn CLĐN. Trong khi biến đổi Wavelet có thể phân tích thành các tín hiệu với nhiều dải tần số thì phân tích RMS giúp định lượng được các giá trị đó. Bộ quy tắc định lượng cho phép việc phân loại nhiễu loạn CLĐN trở nên đơn giản, rõ ràng. Phương pháp đề xuất đã thực hiện phân loại cho các hiện tượng nhiễu loạn thường gặp bao gồm: Sụt áp ngắn hạn (Sag), tăng áp ngắn hạn (Swell), gián đoạn điện áp (Interruption), quá độ (Transient), sóng hài (Harmonic), điện áp nhấp nháy (flicker), điện áp bị nhiễu (noise). Kết quả mô phỏng cho thấy, sự chính xác cao của phương pháp đề xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. Sharmela, M.R. Mohan, G.Uma and J.Baskaran. "A Novel Detection and Classification Algorithm for Power Quality Disturbances using Wavelets". *American Journal of Applied Sciences* 3 (10): 2049-2053, 2006, ISSN 1546-9239.
- [2] Shilpa R & Dr. P S Puttaswamy. "Detection and Classification of Short Transients and Interruption using Hilbert Transform". *Global Journal of Researches in Engineering: Electrical and Electronics Engineering*, Volume 15 Issue 4 Version 1.0 Year 2015. Online ISSN: 2249-4596 & Print ISSN: 0975-5861.
- [3] Hassan Feshki Farahani. "Fuzzy Based Power Quality Disturbances Identification in Power Systems". *Journal of Basic and Applied Scientific Research*. Vol 1(12)2635-2640, 2011. ISSN 2090-4304.
- [4] P. Sai revathi 1, G.V. Marutheswar. "Classification Of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform and S-Transform Based Artificial Neural Network". *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. Vol. 2, Issue 12, December 2013. ISSN (Online): 2278 – 8875.
- [5] Nanhua Yu, Chuanjian Li, Rui Li, Wei Liu. "Classification of Composite Power Quality Disturbance Signals Based on HHT and S-Transform". 3rd International Conference on Electric and Electronics (EEIC 2013). Published by Atlantis Press.
- [6] Shilpa R, Shruthi S Prabhu, Dr P S Puttaswamy. "Analysis of Power Quality Disturbances using Empirical Mode Decomposition and SVM Classifier". *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*. Volume 4, Issue 5, May 2015.
- [7] D. Saxena, K.S. Verma and S.N. Singh. "Power quality event classification: an overview and key issues". *International Journal of Engineering, Science and Technology*. Vol. 2, No. 3, 2010, pp. 186-199.
- [8] Bollen M.H.J., Gu I.Y.H., Axelberg P.G.V. and Styvaktakis E., 2007. "Classification of underlying causes of power quality disturbances: deterministic versus statistical methods". *EURASIP*

- Journal on Advances in Signal Processing*, pp.1-17.
- [9] Alex Wenda, Aini Hussain, M. A. Hannan, Azah Mohamed Salina Abdul Samad. "Web Based Automatic Classification of Power Quality Disturbances Using the S-transform and a Rule Based Expert System". *Journal of Information & Computational Science* 8: 12 (2011) 2375–2383.
 - [10] Yan Zhao, Yonghai Xu, Xiangning Xiao, Yongqiang Zhu, Chunlin Guo. "Power Quality Disturbances Identification Based on dq Conversion, Wavelet Transform and FFT". *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448526
 - [11] Dung Vo Tien, Veleslav Mach, Radomir Gono and Zbigniew Leonowicz. "EMTP/ATP Simulation of Power Quality Disturbances in Medium Voltage Grid". *14th annual workshop WOFEX 2016. Ostrava, Czech republic*, pp. 73-78, ISBN 978-80-248-3961-5.
 - [12] Dung Vo Tien, Veleslav Mach, Radomir Gono and Zbigniew Leonowicz. "Analysis and Simulation of the Causes of Power Quality Disturbances". *13th annual workshop ELNET 2016. Ostrava, Czech Republic*, pp. 10-19, ISBN 978-80-248-4008-6.
 - [13] Dung Vo Tien, Radomir Gono and Zbigniew Leonowicz. "Analysis and simulation of causes of voltage sags using EMTP". *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977866.
 - [14] M. E. Salem, A. Mohamed, S. A. Samad, "Rule based system for power quality disturbance classification incorporating S-transform features", *Journal of Expert Systems with Applications*, Volume 37, issue 4, April 2010, 3229-3235.

(BBT nhận bài: 05/4/2019, hoàn tất thủ tục phản biện: 30/3/2020)