

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Symulacje komputerowe w rozwiązywaniu zagadnień transferu energii przebiegów niesinusoidalnych

Maciej Klebba¹, Arkadiusz Frącz¹, Michał Brodzicki¹, Adrianna Rzepkowska²

¹Katedra Elektrotechniki Okrętowej, Akademia Marynarki Wojennej

²Katedra Elektrotechniki, Uniwersytet Morski w Gdyni

email: m.klebba@amw.gdynia.pl, a.fracz@amw.gdynia.pl, m.brodzicki@amw.gdynia.pl, a.rzepkowska@amw.gdynia.pl

STRESZCZENIE: W referacie przedstawiono modele symulacyjne obwodów energetycznych z sygnałami niesinusoidalnymi oraz opisano występujący w nich transfer energii. Przedstawiono aktualnie stosowane metody obliczeniowe oparte na teoriach obwodów w zastosowaniu do przedstawionych układów. Wyniki obliczeń porównano z wynikami otrzymanymi z symulacji komputerowej. Wyniki obliczeń oraz wyniki symulacji w różnych konfiguracjach porównano z wynikami uzyskanymi na obiektach rzeczywistych. W wyniku badań przedstawiono podstawowe niedokładności metod oraz możliwe błędy wynikające z zastosowania symulacji komputerowej.

SŁOWA KLUCZOWE: transfer energii, przebiegi niesinusoidalne, symulacja, moc bierna, współczynnik mocy

1. Wstęp

Właściwości energetyczne obwodów w których występują sygnały sinusoidalne są dobrze zbadane, opisane i obliczenia związane z transferem energii w tych obwodach nie stanowią większego problemu. W praktyce jednak jakość energii elektrycznej w rzeczywistych obwodach często daleka jest od ideału a co za tym idzie przebieg sygnału nie jest przebiegiem składającym się z czystej sinusoidy. Sytuacja ta w ostatnich latach ma coraz większe znaczenie ze względu na ciągły wzrost zastosowań urządzeń wyposażonych w przekształtniki elektroenergetyczne generujące zakłócenia oraz coraz szersze wprowadzanie odnawialnych źródeł energii do systemu elektroenergetycznego. Jak więc poradzić sobie z opisem zjawisk zachodzących w układach z niesinusoidalnymi przebiegami?

Nie jest to ani proste ani w pełni rozpoznane zagadnienie. W ciągu ostatnich ponad stu lat badań nad tymi zagadnieniami powstało wiele teorii, interpretacji i „szkół” teorii mocy. Każda z nich posiada założenia które mają pomoc w prawidłowej interpretacji zjawisk fizycznych jednak każda z nich doczekała się udowodnionych błędów w interpretacji. Celem badań było sprawdzenie poprawności interpretacji najbardziej rozpowszechnionych teorii przy wykorzystaniu technik symulacji komputerowej.

2. Teoria mocy biernej

Już w XIX wieku zostało zdefiniowane podstawowe równanie mocy wiążące ze sobą pojęcie mocy czynnej P , mocy biernej Q i mocy pozornej S :

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1)$$

Główne rozterki naukowców skupiają właśnie na mocy biernej, ponieważ dla części świata naukowego jest to tylko

zapis matematycznych, dla drugiej części występuje ona faktycznie. Profesor C.I. Budeanu [1] określił on prąd i napięcie obwodu jako sumę harmonicznymi i tym samym zdefiniował w 1927 roku moc bierną jako:

$$Q \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (2)$$

Wprowadził także nową wielkość energetyczną – moc odkształcenia, którą zdefiniował jako:

$$D \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (3)$$

Prof. Budeanu opiera istnienie mocy biernej jako sumę harmonicznymi, czyli zlicza on wszystkie pojedyncze sinusoidy, które tworzą wybrany przebieg.

Drugim najczęściej stosowanym podejściem jest teoria profesora Fryzego. Opiera się ona na istnieniu prądu biernego ortogonalnego względem prądu czynnego a moc bierna wynosi [2]:

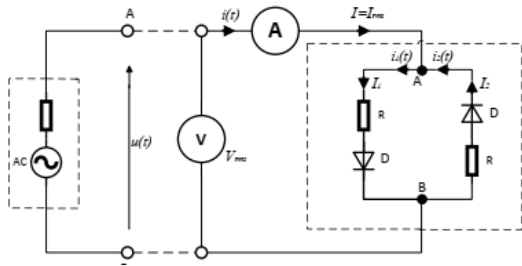
$$Q \stackrel{\text{def}}{=} \|u\| \cdot \|i_{rF}\| \quad (4)$$

Autor tej metody wyznaczył parametry energetyczne bez zastosowania szeregów Fouriera.

3. Badania symulacyjne

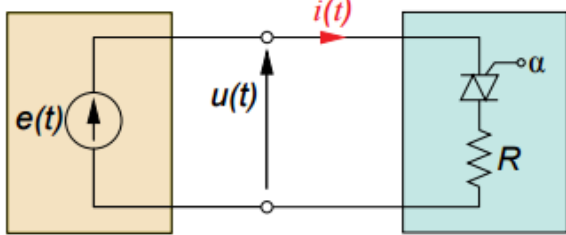
W literaturze można spotkać wiele przykładów wskazujących na niedoskonałości poszczególnych teorii w przypadku rozpatrywania przebiegów niesinusoidalnych. W artykule poddano analizie dwa przykładowe obwody z obciążeniami rezystancyjnymi w których nie powinna pojawić się moc bierna.

Pierwszym obwodem jest połączenie równoległe dwóch odbiorników rezystancyjnych z których każdy zasilany jest połową sygnału sinusoidalnego. (rys 1.)



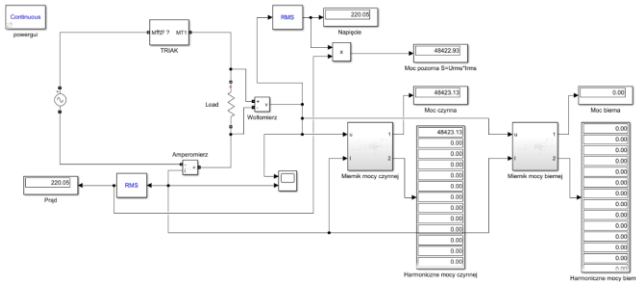
Rys. 1. Odbiornik rezystancyjny zasilany połową sygnału

Drugim obwodem jest odbiornik rezystancyjny zasilany sygnałem sinusoidalnym poprzez triak. (rys. 2)



Rys. 2. Odbiornik rezystancyjny zasilany poprzez triak

Oba układy zostały zasymulowane w środowisku MATLAB Symulink w celu sprawdzenia obliczeń teoretycznych. W wyniku symulacji sprawdzano możliwość uzyskania mocy biernej przy obciążeniach rezystancyjnych (rys. 3).



Rys. 3. Układ nr 2 w MATLAB Symulink

4. Wyniki symulacji

Przebadanie pierwszego układu pozwoliło na zweryfikowanie tezy że w przypadku układów z niesinusoidalnym przebiegiem napięcia jego wartość RMS nie zawsze jest równa wartości skutecznej tego napięcia. Układ ten został poddany analizie matematycznej przez profesora Hartmana [3].

Z jego analizy wynika, że natężenie prądu w każdej z gałęzi wynosi:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} i^2(t) dt} = \frac{I_{RMS}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T/2}^T i^2(t) dt} = \frac{I_{RMS}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Natomiast napięcie w gałęziach wynosi:

$$V = \frac{V_{RMS}\sqrt{2}}{2} = \frac{V_{RMS}}{\sqrt{2}} < V_{RMS} \quad (7)$$

Zarówno badania symulacyjne jak i badania na obiekcie rzeczywistym potwierdziły obliczenia matematyczne.

Przykład drugi został poddany analizie matematycznej przez Profesora Czarneckiego [4]. Wyniki symulacji potwierdzają obliczenia w przypadku przyjęcia że napięcie skuteczne na odbiorniku jest równe napięciu RMS zasilania. Z kolei w przypadku zastosowania obliczeń mocy za pomocą watomierza mierzącego moc na podstawie chwilowych wartości napięć i prądów okazuje się że wyliczenia teoretyczne nie są prawidłowe.

5. Podsumowanie

Po przeprowadzeniu badań symulacyjnych oraz badań obiektów rzeczywistych można wysnuć następujące wnioski

- 1) Opis matematyczny układów z niesinusoidalnymi przebiegami jest trudny do zdefiniowania a wynik zależy od właściwej interpretacji konkretnego układu elektroenergetycznego.
- 2) Symulacje komputerowe pozwalają w sposób szybki opisać stany energetyczne w poszczególnych punktach układu, jednak niewłaściwe zinterpretowanie wyników może prowadzić do błędnych wniosków
- 3) Wartość skuteczna napięcia oddziaływującego na odbiornik nie zawsze jest równa teoretycznej wartości RMS.

Założenie że wartość skuteczna napięcia nie zawsze jest równa wartości RMS powinno być zawsze brane pod uwagę przy rozpatrywaniu układów z przebiegiem napięcia innym niż sinusoidalne.

Literatura

- [1] Budeanu, C.I., *Reactive and apparent powers*, Institut Romain de l'Energie, Bucharest 1927.
- [2] Fryze S., *Elektrotechnika ogólna. T3 prądy zmienne. Cz. 1, Ogólne rozważania o prądach zmiennych*, Komisja Wydawnicza Kół Naukowych i Towarzystwa Bratniej Pomocy Studentów Politechniki Lwowskiej, Lwów (in Polish) 1933.
- [3] Hartman M., *A few remarks on the energy transfer analyses during a time less than period t for voltage and current waveforms in electrical circuits*, Scientific Journal of Gdynia Maritime University, Gdynia 2022.
- [4] Czarnecki L., *Moce i kompensacja w obwodach z odkształconymi i niesymetrycznymi przebiegami napięć i prądów*, Automatyka, Elektryka, Zakłócenia Vol.6, Nr 3(21) 2015.