

## Rozdział 6

### Podsumowanie i charakterystyka dalszych badań

Przedstawiona praca należy do obszaru badań nowych metod transformowania napięć przemiennych. Dotyczy ona impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie ze sprzężeniem elektrycznym oraz hybrydowym, które mogą być stosowane zamiast obecnie wykorzystywanych rozwiązań przemysłowych (transformatorów konwencjonalnych, sterowników tyrystorowych).

Celem niniejszej pracy było przedstawienie topologii, metody modelowania, funkcji układowych SM oraz SMR i właściwości układów z tymi sterownikami w stanie ustalonym oraz przedstawienie przykładów zastosowań omawianych układów. Cel ten został zrealizowany przez:

- opracowanie topologii i realizacji układowych jedno- i trójfazowych impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie z SM oraz SMR;
- opracowanie metody modelowania impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie bazującej na modelach obwodowych uśrednionych sterowników oraz ich opisie zaciskowym (czwórnikowym);
- wykazanie zbieżności rozwiązań równań zmiennych stanu i uśrednionych zmiennych stanu, które opisują omawiane układy przy częstotliwości przełączania  $f_S \rightarrow \infty$ ;
- ocenę dokładności modeli uśrednionych zmiennych stanu impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie za pomocą ilościowej analizy amplitudowych i fazowych błędów uśredniania;
- opracowanie modeli obwodowych uśrednionych SM i SMR ich opisu zaciskowego (czwórnikowego) oraz funkcji układowych tych sterowników;

- określenie zależności opisujących właściwości impulsowych układów transformujących napięcia prądu przemiennego z modelami obwodowymi uśrednionymi SM i SMR oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych weryfikujących zależności teoretyczne tych właściwości;
- opracowanie systematyki topologii, realizacji układowych oraz modeli obwodowych uśrednionych jedno- i trójfazowych impulsowych układów transformujących napięcia prądu przemiennego;
- opracowanie systematyki propozycji zastosowań jedno- i trójfazowych impulsowych układów transformujących napięcia prądu przemiennego;

Do najważniejszych, zdaniem autora, osiągnięć własnych uzyskanych w pracy należy zaliczyć:

- w zakresie topologii:

- opracowanie topologii jedno- i trójfazowych SMR do stosowania w impulsowych układach transformujących napięcia prądu przemiennego, przez adaptację topologii przekształtników prądu stałego na prąd stały (DC/DC);
- systematykę jedno- i trójfazowych topologii SM i SMR (schematy zastępcze z łącznikami idealnymi) oraz realizacji układowych impulsowych układów transformujących napięcia prądu przemiennego z SM i SMR, wraz z własnymi wynikami badań symulacyjnych i eksperymentalnych omawianych układów;

- w zakresie koncepcji metody modelowania:

- wprowadzenie operatora uśredniania zmiennych stanu, za pomocą którego można uśredniać zmienne stanu w każdym cyklu przełączania oddzielnie, co pozwala wykorzystać metodę uśrednionych zmiennych stanu do modelowania omawianych układów;
- wykazanie zbieżności rozwiązań równań zmiennych stanu i uśrednionych zmiennych stanu, opisujących omawiane układy, dla harmonicznych podstawowych zmiennych stanu przy częstotliwości przełączania  $f_S \rightarrow \infty$ ;
- przeprowadzenie ilościowej oceny błędów amplitudowych i fazowych uśrednionych zmiennych stanu, w omawianych układach, dla skończonej częstotliwości przełączania  $f_S$ ;
- opracowanie i systematykę schematów zastępczych jedno- i trójfazowych układów transformujących napięcia prądu przemiennego z modelami obwodowymi uśrednionymi SM oraz SMR;

- opracowanie opisu zaciskowego (czwórnikowego) modeli obwodowych uśrednionych SM oraz SMR oraz określenie parametrów łańcuchowych modeli obwodowych uśrednionych podstawowych topologii SM oraz SMR;
- w zakresie funkcji układowych sterowników i właściwości układów transformujących napięcia przemiennie:
- określenie zależności opisujących podstawowe funkcje układowe SM i SMR oraz podstawowe właściwości układów z tymi sterownikami oraz weryfikacja zależności teoretycznych za pomocą badań symulacyjnych i eksperymentalnych;
  - analiza podstawowych zależności opisujących zjawiska rezonansowe w omawianych układach z modelami obwodowymi uśrednionymi SM i SMR oraz częściowa weryfikacja zależności teoretycznych za pomocą badań symulacyjnych;
- w zakresie zastosowań: systematykę propozycji zastosowań impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie, wraz z propozycjami własnymi autora, z wykorzystaniem w ich opisie modeli obwodowych uśrednionych SM i SMR opracowanych w ramach pracy.

Autor ma nadzieję, że przedstawione w pracy topologie, metoda modelowania i właściwości impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie, stanowiąc będą efektywną bazę w rozwijaniu i analizie nowych użytecznych zastosowań omawianych układów.

**Charakterystyka dalszych badań.** Niniejsza monografia jest podsumowaniem i rozwinięciem dotychczasowych prac autora w zakresie impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie. W trakcie jej opracowywania pojawiły się zagadnienia, które zdaniem autora powinny być dalej rozwijane.

Kontynuacji wymagają badania właściwości omawianych układów w stanie ustalonym w zakresie trójfazowych układów z SMR niesymetrycznymi oraz izolowanymi. Zawierają one mniejszą ilość łączników niż układy z SM symetrycznymi, a przez to mogą mieć mniejsze wewnętrzne straty mocy i wyższy współczynnik sprawności. Kontynuacji wymagają również badania układów z SMR o topologiach złożonych. Należy przy tym uwzględnić topologie o kwadratowym współczynniku transformacji napięcia (topologie typu *quadratic*). Takie rozwiązania układów transformujących napięcia przemiennie mogą być przydatne w zastosowaniach wymagających szerokich zmian wartości współczynnika transformacji napięcia (o wartości maksymalnej od kilkunastu do kilkudziesięciu). Zagadnienia, które należy jeszcze rozwijać wymagają analizy właściwości omawianych układów w warunkach niesymetrycznych i odkształconych napięć zasilania. Istotnym problemem jest ciągłe poprawa

współczynnika sprawności omawianych układów. W tym zakresie konieczne są badania dotyczące nowych realizacji układowych z regeneracyjnymi układami ochrony przepięciowej oraz łącznikami rezonansowymi.

Rozwinięcia wymagają badania właściwości dynamicznych omawianych układów przez opracowanie małosygnalowych modeli obwodowych uśrednionych SM i SMR oraz badania charakterystyk czasowych układów z tymi sterownikami. Pozwoli to na pełną ocenę przydatności omawianych układów w rozwiązaniach aplikacyjnych, w których są stosowane układy transformujące napięcia przemiennie.

Oddzielnym zagadnieniem jest rozwinięcie prowadzonych prac w celu opracowania topologii, modelowania i właściwości przekształtników matrycowo-reaktancyjnych (PMR), jako bezpośrednich przemienników częstotliwości, które umożliwiają zmniejszanie i zwiększanie napięcia zasilania (PMR typu buck-boost).