

# Rozdział 1

## Wprowadzenie

### 1.1. Bezpośrednie transformowanie napięć przemiennych

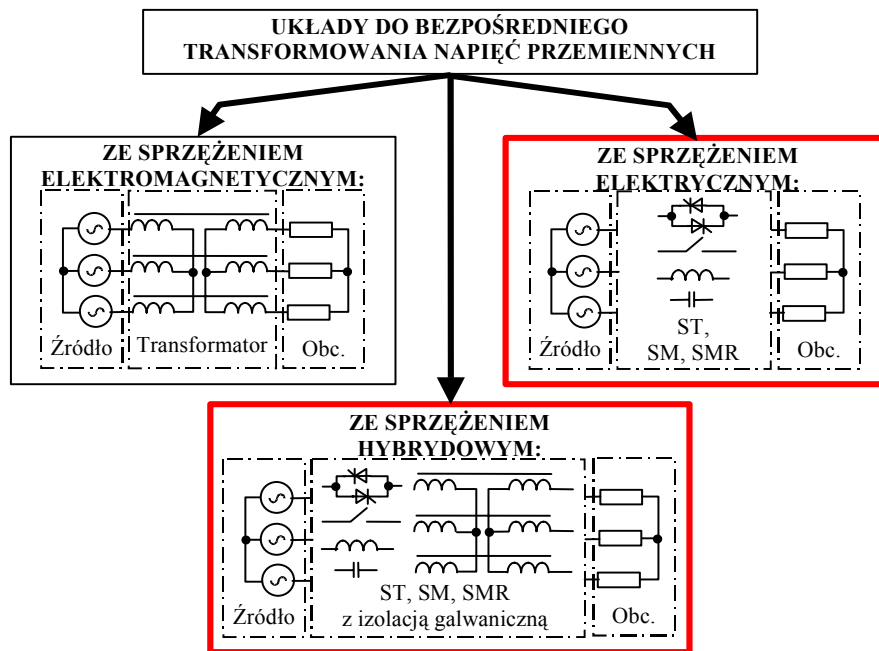
Bezpośrednie transformowanie napięć przemiennych jest formą zmiany parametrów wielkości fizycznych charakteryzujących energię elektryczną prądu przemiennego (AC). Polega ono na zmianie napięcia, a przez to prądu oraz mocy obciążenia, bez zmiany częstotliwości jego harmonicznej podstawowej, która jest taka sama jak częstotliwość napięcia zasilania, podobnie jak w przypadku transformowania napięć przemiennych za pomocą transformatora konwencjonalnego.

Ogólną klasyfikację jednofazowych i trójfazowych układów prądu przemiennego (AC) do bezpośredniego transformowania napięć przemiennych pokazano na rys.1.1, gdzie zamieszczono uproszczone schematy układów trójfazowych, które można traktować jako przykład skojarzonych układów jednofazowych. W przedstawionej klasyfikacji wyróżnikiem jest sposób transformowania napięć przemiennych.

Omawiane układy można podzielić na trzy grupy. Na układy, w których jest stosowane tylko sprzężenie elektromagnetyczne (transformatory konwencjonalne). Drugą grupę stanowią układy, w których stosowane jest tylko sprzężenie elektryczne. Do trzeciej grupy zaliczono układy hybrydowe (ze sprzężeniem elektrycznym i elektromagnetycznym). Do drugiej i trzeciej grupy zaliczono układy z łącznikami nie w pełni sterowanymi (układy tyrystorowe o sterowaniu fazowym albo integracyjnym z tyrystorami typu SCR) oraz układy z łącznikami w pełni sterowanymi (układy impulsowe o sterowaniu typu PWM z tranzystorami typu MOSFET, IGBT lub tyrystorami typu GTO).

Jak wspomniano o tym wcześniej, omawiane układy umożliwiają zmianę wartości napięcia bez zmiany częstotliwości jego harmonicznej podstawowej. Koncepcja ich topologii, która jest omawiana i rozwinięta dalej (podrozdział 1.2 oraz rozdział 1), bazuje na topologiach bezpośredniego przekształtnika maciercowego AC/AC oraz topologiach przekształtników DC/DC. W celu wyraźnego

odróżnienia mniejszego zakresu funkcjonalnego przekształtników stosowanych w omawianych układach od zakresu funkcjonalnego bezpośrednich przekształtników matrycowych AC/AC, w monografii wprowadzono nazwę *sterownik*. Dlatego przekształtniki (rys. 1.1) stosowane w układach tyrystorowych są nazywane sterownikami tyrystorowymi (ST) prądu przemiennego, natomiast przekształtniki stosowane w układach impulsowych są nazywane sterownikami matrycowymi (SM) oraz sterownikami matrycowo-reaktancyjnymi (SMR) prądu przemiennego. W literaturze dotyczącej omawianych układów, nazwa sterownik (z ang. *controller*) jest powszechnie stosowana w odniesieniu do układów tyrystorowych [2], [27], [43], [62], [90], [113], [145]. W odniesieniu do układów impulsowych, oprócz nazwy sterownik [12], [19], [23] – [28], [30], [73], [74], [84], [103], [118] – [122], [124] – [128] [147], [162] są stosowane nazwy: czoper (z ang. *chopper*) [1], [3], [21], [22], [65], [70], [87], [91], [92], [156], [159], kondycjoner (z ang. *conditioner*) [6], [18], [29], [31], [34], [35], [37], [44], [82], [123], [131], [157], przekształtnik (z ang. *converter*) [46], [63], [69], [79] – [81], [83], [86], [102], [105], [107], [116], [161], transformator prądu przemiennego (z ang. *AC/AC transformer*) [36], [37], [39] – [41], [60], [72], [78], [155] oraz regulator [56], [118].



Rys. 1.1. Podział ogólny układów do bezpośredniego transformowania napięć przemiennych; ST – sterownik tyrystorowy, SM – sterownik matrycowy, SMR – sterownik matrycowo-reaktancyjny

Monografia dotyczy impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie ze sprzężeniem elektrycznym oraz hybrydowym. Obejmuje ona jedno- i trójfazowe układy, z SM oraz SMR o sterowaniu typu PWM, w których są stosowane łączniki w pełni sterowalne (z tranzystorami typu MOSFET, IGBT lub tyrystorami typu GTO) o częstotliwości przełączania  $f_s \gg f$  (gdzie:  $f$  – częstotliwość napięcia zasilania). Topologie SM zawierają tylko łączniki w pełni sterowalne, natomiast topologie SMR zawierają łączniki oraz dodatkowe elementy pasywne  $LC$ , podobnie jak przekształtniki DC/DC. Układy z SMR stanowią nową grupę omawianych układów impulsowych. W monografii najczęściej uwagi poświęcono zwłaszcza tym układom.

Rozwój prac nad układami z SM oraz SMR wynika z ich korzystnych właściwości w porównaniu z właściwościami układów ze sterownikami tyrystorowymi. W ujęciu ogólnym, najistotniejsze z nich to: korzystne przesunięcie wartości pulsacji wyższych harmonicznych prądu wejściowego do wartości  $(\omega_s \pm \omega)$ , gdzie:  $\omega_s$  – pulsacja przełączania,  $\omega$  – pulsacja napięcia zasilającego; możliwość zmniejszania i zwiększania wartości napięcia wyjściowego odpowiednio poniżej lub powyżej wartości napięcia zasilającego (praca typu buck-boost). Układy z SM oraz SMR są traktowane jako alternatywne do układów z transformatorami konwencjonalnymi. Dotyczy to zwłaszcza zastosowań wymagających szybkiej (odbywającej się znacznie krócej od okresu transformowanego napięcia) zmiany transmitancji napięciowej (prądowej) w tych układach. Należy jednak podkreślić, że pod względem funkcjonalnym układy z transformatorami idealnymi są traktowane jako wzorcowe układy do transformowania napięć przemiennych, co przedstawiono w pracy zespołowej z udziałem autora [27]. Prace nad omawianymi układami impulsowymi znajdują się w obszarze badań dotyczących nowych metod efektywnego transformowania napięć przemiennych.

## 1.2. Ogólny przegląd literatury

W zastosowaniach przemysłowych układów ze sprzężeniem elektrycznym lub hybrydowym dominują układy z ST. Są one stosowane w układach o szerokim zakresie mocy, od setek VA do setek MVA, a ich funkcje układowe i właściwości są dobrze poznane i przedstawione w pracach [2], [6], [11], [43], [57], [90], [101], [113], [130], [134] – [136], [143] – [145] oraz pracach własnych autora [14] – [16] i zespołowej z udziałem autora [27]. Układy z ST są stosowane w urządzeniach wykonawczych w elektrotermii, urządzeniach techniki świetlnej oraz w układach “miękkiego startu” (z ang. *soft starters*) układów napędowych oraz układach typu FACTS. Ich główne wady to: powodowanie przesunięcia fazowego harmonicznej podstawowej prądu wejściowego oraz znaczne odkształcenia przebiegów czasowych tego prądu (generowanie wyższych harmonicznych niskoczęstotliwościowych) w układach o sterowaniu fa-

zowym oraz generowanie interharmonicznym w układach o sterowaniu integralnym. Ponadto, w zastosowaniach jako układy typu FACTS (np. kompensator równoległy typu FCTCR lub szeregowy typu TCSC) wadą jest niedostateczna dynamika ze względu na ograniczenie wynikające z właściwości łączników nie w pełni sterowalnych (tyrystorów SCR) [11], [58], [62], [77], [101], [108].

Już w latach 70-tych XX w. podjęto prace nad impulsowymi układami transformującymi napięcia przemiennie z łącznikami w pełni sterowanymi oraz o sterowaniu typu PWM (Emanuel-Eigeles, Appelbaum, 1970 [12], Mozdzer, Bose, 1976 [103]). Pierwsze prace dotyczyły układów jednofazowych ze sterownikiem matrycowym (SM) prądu przemiennego (AC). Topologia tych sterowników bazuje na topologii przekształtnika singularnego [153], podobnej do topologii przekształtnika prądu stałego na prąd stały (DC/DC) typu buck, który zawiera jeszcze filtr dolnoprzepustowy  $LC$ . Topologie trójfazowe tych układów bazują na topologii przekształtnika matrycowego (z ang. *matrix converter*) o zredukowanej ilości łączników oraz uproszczonej funkcji przekształcania. Umożliwiają one tylko zmianę (zmniejszanie) wartości napięcia wyjściowego bez zmiany częstotliwości harmonicznej podstawowej tego napięcia. Dlatego są nazywane sterownikami matrycowymi (SM). Klasyczny przekształtnik matrycowy umożliwia zarówno zmianę wartości (zmniejszanie) napięcia wyjściowego, jak i zmianę częstotliwości i fazy tego napięcia [55], [155].

W grupie SM występują SM jednobiegunowe oraz SM dwubiegunowe (rys. 2.3). Takie rozróżnienie sterowników wynika stąd, że bierze się pod uwagę biegunowość harmonicznej podstawowej napięcia obciążenia w przedziale czasu odpowiadającym połowie okresu tego napięcia. Korzystną właściwością SM dwubiegunowych jest możliwość zmiany biegunowości (przesunięcie fazowe 0 lub  $\pi$ ) harmonicznej podstawowej napięcia obciążenia. Topologie, realizacje układowe oraz funkcje układowe SM są przedstawione w wielu innych niż wymienione wcześniej pracach. Układy jednofazowe z SM jednobiegunowymi są omawiane w pracach [1], [6], [46] – [49], [53], [56], [75], [91], [117], [127], [139], [140], [143] oraz pracy własnej autora [19] i pracach zespołowych z udziałem autora [24], [27], [28], [30], [32]. Układy trójfazowe z tymi sterownikami są ponadto przedstawione w pracach [3], [134], [136], [141], [162] oraz pracy własnej autora [16] i pracach zespołowych z udziałem autora [23], [25], [26], [80], [81], [118] – [126], [128], [132], [133], [147]. Dodatkowo należy jeszcze uwzględnić prace, które dotyczą tylko SM dwubiegunowych o sterowaniu PWM [50], [52], [54], [61], [74], [107], łącznie z pracą zespołową z udziałem autora [51]. Ponadto, w pracach [65], [66], [159] przedstawiono SM jednobiegunowe o sterowaniu typu APWM. Ostatnie wymienione prace, dotyczące SM o sterowaniu APWM, obejmują rozwiązanie umożliwiające poprawę wejściowego współczynnika mocy za pomocą podanej techniki sterowania.

W ujęciu ogólnym, właściwości układów z SM oraz filtrami dolnoprzepustowymi  $LC$  (wejściowym oraz wyjściowym) są w znacznej części za-

kresu sterowania podobne do właściwości układu z transformatorem idealnym obniżającym napięcie. Dla częstotliwości przełączania  $f_s > 5$  kHz, taki zakres zmian sygnału sterującego odpowiada wartościom współczynnika wypełnienia  $D > 0,3$  w układach z SM jednobiegunowymi. Wraz ze wzrostem częstotliwości przełączania ten zakres się zwiększa, przy czym istotnym ograniczeniem jest wówczas zmniejszanie współczynnika sprawności omawianych układów wraz ze wzrostem częstotliwości przełączania. W tym kontekście właściwości układów z SM są znacznie korzystniejsze od właściwości układów ze sterownikami tyrystorowymi. Jest to szczegółowo przedstawione w pracach własnych autora [16], [19] oraz pracach wspólnych z udziałem autora [25], [27], [80], [128].

Sterowniki matrycowe są często łączone kaskadowo z transformatorami. Otrzymujemy w ten sposób układ z SM izolowanym, który jest traktowany jako układ transformujący napięcia przemiennie ze sprzężeniem hybrydowym (elektrycznym i elektromagnetycznym). Właściwości takich układów zależą dodatkowo od przekładni napięciowej transformatora. Właściwości układów z SM izolowanymi były przedmiotem cytowanych już wcześniej prac, w tym również prac zespołowych z udziałem autora [27], [79], [119], [124], [147]. W tej grupie układów wartość częstotliwości harmonicznej podstawowej strumienia magnetycznego w rdzeniu transformatora jest taka sama jak częstotliwość napięcia zasilającego (50 lub 60 Hz).

Oddzielną grupę SM izolowanych stanowią sterowniki o sterowaniu PWM z przesunięciem fazowym. Taki sposób sterowania został wprowadzony przez McMurray'a w 1970 (za Harada i inni [59]) do przekształtników prądu stałego na prąd przemienny (DC/AC). W układach z tymi SM występuje wysokoczęstotliwościowe transformowanie energii elektrycznej przez transformator. Wykorzystuje się w nich przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami prostokątnymi o współczynniku wypełnienia impulsu  $D = 0,5$  sterującymi łączniki w pełni sterowalne po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora. Daje to efekt w postaci wyeliminowania harmonicznej podstawowej strumienia magnetycznego w rdzeniu transformatora o częstotliwości napięcia zasilającego (50 lub 60 Hz), a przez to istotną redukcję masy i wymiarów transformatora. Omawiane układy i ich właściwości są opisane w pracach [60], [72] – [74], [76] oraz pracach zespołowych z udziałem autora [27], [71].

Pod koniec lat 80 – tych ubiegłego wieku, pojawiły się publikacje dotyczące topologii i właściwości jednofazowych impulsowych układów transformujących napięcie przemiennie ze sterownikami matrycowo-reaktancyjnymi (SMR) (Ngo, 1986 [63], Hofmeester, van den Bosch, Klassens, 1993 [105]). W przedstawionych w tych pracach SMR wykorzystano znane topologie przekształtników prądu stałego na prąd stały (DC/DC) typu boost, buck oraz flyback, które są omawiane w pracach [9], [13], [100], [101], [112], [149]. Koncepcja topologii tych sterowników bazuje na prostej adaptacji topologii przekształtników DC/DC. Adaptacja polega na zastąpieniu jednokierunkowych

łączników w pełni sterowalnych oraz diod, dwukierunkowymi łącznikami w pełni sterowanymi. Następnie ta koncepcja topologii SMR była rozwijana na bazie innych znanych topologii przekształtników DC/DC. Jest to ujęte w pracach [70], [88], [134], [161] oraz pracach własnych autora [18], [20] – [22] i pracach zespołowych z udziałem autora [27], [29], [32], [37], [38], [41], [42], [44], [87]. Prace te obejmowały SMR jednobiegunowe i dwubiegunowe (rys. 2.3). Podział SMR na takie dwie podgrupy wynika z kryterium, które przedstawiono wcześniej przy omawianiu podziału SM. Skuteczność implementacji tak adaptowanych układów do transformowania napięcia przemiennego wynika z liniowości modeli stałoprądowych (modeli DC) przekształtników DC/DC w stanie ustalonym [13], [89], [93], [100], [112]. Ponadto potwierdzeniem skuteczności takiego podejścia do budowania topologii omawianych sterowników, oprócz prac wymienionych wcześniej, są prace dotyczące syntezy przekształtników energoelektronicznych np. [5], [94], [109], [154].

**Wyniki badań właściwości układów z SMR, zamieszczone we wspomnianych wcześniej pracach własnych autora oraz pracach zespołowych z udziałem autora, pozwalają uznać za słuszną tezę, że wszystkie topologie przekształtników DC/DC po zamianie łączników jednokierunkowych na dwukierunkowe mogą być zastosowane do impulsowego transformowania napięć przemiennych.** W ujęciu ogólnym, korzystnym efektem słuszności tej tezy jest istotne rozwinięcie koncepcji topologii omawianych układów. Otrzymujemy w ten sposób nową grupę impulsowych układów transformujących napięcie przemiennie, które umożliwiają beztransformatorowe zwiększanie wartości napięcia obciążenia powyżej wartości napięcia zasilania. Taka właściwość układów z SMR jest ich istotną zaletą w porównaniu z właściwościami układów ze sterownikami, które omówiono wcześniej. Ponadto, ta koncepcja topologii układów transformujących napięcia przemiennie daje zwiększenie możliwości kształtowania właściwości układów z tymi sterownikami przez wykorzystanie nowych funkcji układowych SMR.

Naturalnym rozwinięciem prac dotyczących układów jednofazowych z topologiami SMR było ich kontynuowanie w zakresie układów trójfazowych. Koncepcję topologii takich SMR, zarówno symetrycznych jak i niesymetrycznych, przedstawiono w pracy [160] oraz znacznie obszerniej w pracach zespołowych z udziałem autora [29], [31], [32], [34], [38] – [41] [116], [131]. Topologie trójfazowe są budowane przez połączenie topologii jednofazowych omówionych wcześniej. Korzystną właściwością topologii trójfazowych jest mniejsza ilość łączników przypadających na jedną fazę niż w topologiach jednofazowych. W cytowanych wcześniej pracach zespołowych z udziałem autora [32], [36], [38] – [41] przedstawiono również koncepcję topologii jedno- i trójfazowych SMR izolowanych. W tych topologiach jest stosowany dodatkowy transformator, podobnie jak w układach z SM izolowanymi. Warto jednak podkreślić, że topologie SMR dają więcej stopni swobody

w zakresie sposobu włączenia transformatora w strukturę SMR ze względu na większą liczbę węzłów. Dotyczy to zwłaszcza topologii SMR wyższego rzędu. Umieszczenie transformatora w strukturze SMR, oprócz izolacji galwanicznej, daje efekty w postaci istotnej zmiany zależności opisujących jego funkcje układowe oraz zmianę właściwości układu.

Impulsowe układy transformujące napięcia przemiennie są układami okresowo niestacjonarnymi ze względu na impulsowy charakter zmian parametrów łączników w pełni sterowalnych (rysunki 1.2, oraz 1.3) stosowanych w tych układach. Modelowanie, analiza funkcji układowych SM oraz analiza właściwości układów z SM w stanie ustalonym bazują na modelach obwodowych z łącznikami idealnymi oraz metodzie zmiennych stanu lub metodzie funkcji stanu łączników wprowadzonej w pracy Gyugi, Pelly [55]. Pierwsza metoda, zarówno w wersji klasycznej (bezpośrednie rozwiązywanie równań różniczkowych), np. [142], jak i w wersji operatorowej np. [49], daje złożoną postać opisu właściwości układów z SM, niewygodną do stosowania w praktyce. Z tego powodu często wykorzystuje się analizę w dziedzinie częstotliwości przybliżoną metodą funkcji stanu łączników z uwzględnieniem tylko harmonicznej podstawowej np. [27], [157]. Ta metoda jest stosowana w większości wcześniej wymienionych prac dotyczących układów z SM. Ponadto, w pracy własnej autora [19] przedstawiono podejście do modelowania i analizy układów z SM, w którym wykorzystano metodę uśrednionych zmiennych stanu, podobnie jak dla układów z SMR, co jest omówione dalej. Takie podejście daje bardzo prosty i czytelny sposób modelowania i analizy funkcji układowych omawianych sterowników. Może być bardzo użyteczne w praktyce po uwzględnieniu błędów wynikających z techniki uśredniania, które również omówiono dalej. To podejście jest również rozwinięte w monografii.

Modelowanie, analiza funkcji układowych SMR oraz analiza właściwości układów z SMR w stanie ustalonym jest bardziej złożona niż układów z SM. W pracach dotyczących impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie z SMR, przytoczonych wcześniej, są stosowane trzy podejścia do zagadnień modelowania i analizy właściwości tych układów. Pierwsze podejście bazuje na modelu obwodowym SMR z łącznikami idealnymi oraz analizie metodą zmiennych stanu [63]. Drugie podejście bazuje na modelach obwodowych SMR z łącznikami idealnymi oraz przybliżonej metodzie zmiennych stanu (zlinearyzowanych równaniach zmiennych stanu) [70], [161]. Trzecie podejście bazuje na metodzie uśrednionych zmiennych stanu, wprowadzonej w pracy (Middlebrock, Čuk [100]) do analizy przekształtników DC/DC. Ta metoda została później rozwinięta i jest szeroko stosowana [4], [9], [10], [13], [89], [93], [93], [99], [101], [111], [112], [114], [143], [148] – [151], [158], [160], zwłaszcza w analizie przekształtników DC/DC.

Metodę uśrednionych zmiennych do analizy układów z SMR wprowadzono i rozwinięto w pracach własnych autora [18], [19], [21], [22] oraz

w pracach zespołowych z udziałem autora [27], [29] – [31], [35] – [42], [44], [82] – [87], [116]. W przywołanych pracach, początkowo metoda ta była stosowana w sposób heurystyczny. Były w nich przedstawione modele obwodowe uśrednione, które konstruowano według takiej samej procedury jak dla przekształtników DC/DC. Nie uwzględniono jednak wykazania słuszności takiego podejścia. Jest istotne, że takie podejście w obszarze omawianych układów jest formalnie poprawne po uwzględnieniu odpowiedniego operatora uśredniania, co zostało przedstawione w pracy [4] oraz pracach zespołowych z udziałem autora [82] – [87]. **W tych ostatnich pracach przedstawiono dowód zbieżności rozwiązań równań zmiennych stanu i uśrednionych zmiennych stanu, które opisują omawiane układy przy częstotliwości przełączania  $f_s \rightarrow \infty$ , jeśli jest stosowany operator uśredniania w bieżących okresach przełączania (operator uśredniania inny niż w układach z przekształtnikami DC/DC).** Ponadto, w cytowanych ostatnio pracach zespołowych z udziałem autora, przedstawiono ilościową ocenę błędów uśredniania zmiennych stanu przy skończonej częstotliwości przełączania  $f_s$ . Pełna koncepcja metody modelowania omawianych układów z SMR, bazująca na modelach obwodowych uśrednionych SMR oraz ich opisie zaciskowym, jest przedstawiona w monografii.

Potrzebę i celowość badań omawianych układów potwierdzają prace dotyczące ich zastosowań, które obejmują trzy obszary. W pierwszym obszarze SM i SMR są stosowane do sterowania napięcia, prądu oraz mocy obciążenia w układach prądu przemiennego (jako sterowniki prądu przemiennego, z ang. *AC controllers*, czopery prądu przemiennego, z ang. *PWM AC choppers* lub kondycjonery prądu przemiennego, z ang. *PWM AC line conditioners*). Takie zastosowania są omawiane w pracach [1], [3], [6], [12], [45], [46] – [48], [55], [59], [60], [72] – [74], [98], [103], [134], [157], [161], [162] oraz pracach zespołowych z udziałem autora [23], [25] – [32], [35] – [42], [44], [71], [81], [116], [118] – [129], [131] – [133], [147]. Ten obszar obejmuje również zastosowania SM dwubiegunowych o sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym oraz transformatorem wysokoczęstotliwościowym. Drugi obszar, który ostatnio dynamicznie się rozwija, obejmuje zastosowania SM oraz SMR w urządzeniach typu FACTS. Są to propozycje zastosowań w stabilizatorach napięcia przemiennego, które przedstawiono w pracach [11], [50], [52], [54], [61], [76], [92], [104], [107] oraz pracach zespołowych z udziałem autora [32], [36], [38] – [41]. Zastosowania w urządzeniach typu FACTS obejmują również propozycje zastosowań: w przesuwnikach fazy napięcia przemiennego, w równoległych i szeregowych kompensatorach mocy biernej SVC, w kompensatorach krótkotrwałych zapadów napięcia przemiennego (z ang. *voltage sags compensator*) oraz symetryzatorach trójfazowego napięcia zasilania. Te zastosowania są omawiane w pracach [8], [62], [69], [92], [95] – [97], [102], [152], [156], [161] oraz pracach własnych autora [17], [20] i pracach zespołowych z udziałem autora [33] – [35]. Trzeci obszar obejmuje nowe zastosowania



SMR dwubiegunowych do bezpośredniego przekształcania prądu przemiennego na prąd stały (AC/DC) bez stosowania konwencjonalnego prostownika wejściowego, co przedstawiono w pracach [64], [67] oraz pracy zespołowej z udziałem autora [68]. W ostatnich latach można zauważyć wyraźny wzrost zainteresowania zastosowaniami SM i SMR, co jest związane ze wzrostem ilości prac opisujących ich funkcje układowe oraz właściwości układów z tymi sterownikami.

### 1.3. Cel i zakres pracy

Przedmiotem pracy są impulsowe układy transformujące napięcia przemiennie ze sprzężeniem elektrycznym oraz hybrydowym, w których są stosowane sterowniki matrycowe (SM) lub sterowniki matrycowo-reaktancyjne (SMR). Głównym zamierzeniem autora było opracowanie i zestawienie uzyskanych wyników badań tak, aby stanowiły one spójną i efektywną bazę w rozwijaniu i analizie nowych i użytecznych zastosowań omawianych układów.

**Celem pracy, w ujęciu ogólnym, jest przedstawienie topologii, metody modelowania, funkcji układowych SM oraz SMR i właściwości układów z tymi sterownikami w stanie ustalonym oraz zastosowań omawianych układów.** W szerszym ujęciu obejmuje on:

- koncepcję topologii i realizacji układowych jedno- i trójfazowych impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie z SM oraz SMR;
- koncepcję metody modelowania impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie bazującą na modelach obwodowych uśrednionych sterowników oraz ich opisie zaciskowym (czwórnikowym);
- dowód 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 analizę funkcji układowych tych sterowników;
- określenie zależności opisujących właściwości impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie z modelami obwodowymi uśrednionymi SM i SMR oraz wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych tych właściwości;

- systematykę topologii, realizacji układowych oraz modeli obwodowych uśrednionych jedno- i trójfazowych impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie.
- systematykę propozycji zastosowań jedno- i trójfazowych impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie, obejmującą również propozycje własne autora i propozycje zespołowe z udziałem autora.

Praca składa się z sześciu rozdziałów, które są poprzedzone wykazem symboli, oznaczeń i skrótów. Ogólne wprowadzenie w tematykę i opis przedmiotu pracy jest przedstawione w **rozdziale 1**. Ponadto zawiera on przegląd publikacji związanych z tematem, cel i zakres pracy oraz przyjęte założenia upraszczające.

W **rozdziale 2** przedstawione są topologie oraz systematyka realizacji układowych impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie. Zawiera on syntetyczny opis układów z SM, SMR oraz z SM i SMR izolowanymi (ze sterownikami hybrydowymi (SH)). W opisie są wykorzystywane modele obwodowe sterowników z łącznikami idealnymi (modele obwodowe niestacjonarne). Przedstawiono w nim również rozwinięcie dotychczasowych prac, dotyczących omawianych układów w zakresie topologii SMR i SMR izolowanych trójfazowych.

Proponowana w pracy koncepcja metody modelowania omawianych układów jest przedstawiona w **rozdziale 3**. Zawiera on opis ogólny (schemat) proponowanego podejścia do modelowania omawianych układów. Wykorzystuje się w nim zmodyfikowaną technikę uśredniania bazującą na równaniach uśrednionych zmiennych stanu, modelach obwodowych uśrednionych sterowników oraz ich opisie zaciskowym (czwórnikowym). W tym rozdziale przedstawiono dowód zbieżności rozwiązań równań zmiennych stanu i uśrednionych zmiennych stanu, które opisują omawiane układy przy częstotliwości przełączania  $f_s \rightarrow \infty$ , jeśli jest stosowany operator uśredniania w bieżących okresach przełączania (operator uśredniania inny niż w układach z przekształtnikami DC/DC). Zawiera on schematy zastępcze układów z modelami obwodowymi uśrednionymi wszystkich sterowników o topologiach przedstawionych w rozdziale 2. Jest w nim również przedstawiony szczegółowy opis jednofazowych schematów zastępczych omawianych układów w postaci opisu zaciskowego bazującego na równaniach łańcuchowych. Ujęto w nim również ocenę dokładności proponowanych modeli obwodowych uśrednionych sterowników stosowanych w omawianych układach. Zawiera on ilościową ocenę amplitudowych i fazowych błędów uśredniania zmiennych stanu przy skończonej częstotliwości przełączania.

W **rozdziale 4** przedstawiona jest analiza funkcji układowych SM i SMR oraz właściwości impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie z tymi sterownikami w stanie ustalonym. Zawiera on zestawienie zależności analitycznych jako funkcji sygnału sterującego (współczynnika wypełnienia

impulsu  $D$  lub współczynnika przesunięcia fazowego  $\alpha$ ) w układach z modelami obwodowymi uśrednionymi, które opisano w rozdziale 3. Część z tych zależności jest w nim również przedstawiona w postaci graficznej, pozwalającej na porównanie z wynikami badań symulacyjnych omawianych układów z łącznikami idealnymi (układów niestacjonarnych). Są one traktowane jako przykłady wyników badań osiągniętych za pomocą proponowanej koncepcji metody modelowania. Ujęto w nim również przykłady wyników badań wpływu parametrów układów z SMR (warunki dopasowania lub niedopasowania) na podstawowe właściwości tych układów. Ponadto, jest w nim przedstawiony krótki opis zjawisk rezonansowych w omawianych układach.

Systematykę propozycji zastosowań impulsowych układów transformujących napięcia przemiennie, obejmującą również propozycje własne autora oraz propozycje zespołowe z udziałem autora, przedstawiono w **rozdziale 5**. Zawiera on krótkie opisy przykładów zastosowań omawianych układów: jako sterowniki prądu przemiennego, jako podzespoły układów FACTS oraz jako bezpośrednie przekształtniki prądu przemiennego na prąd stały (AC/DC). W tym rozdziale pokazano przydatność, opracowanych w ramach pracy, modeli obwodowych uśrednionych SM i SMR w opisie działania omawianych układów.

**Rozdział 6** zawiera podsumowanie końcowe oraz propozycje dalszych badań. Ponadto praca zawiera dodatki, wykaz literatury oraz streszczenie. W dodatkach przedstawiono: zestawienie topologii SMR, rozwiązania równań zmiennych stanu i uśrednionych zmiennych stanu, przykład wyprowadzenia równań uśrednionych zmiennych stanu, parametry łańcuchowe badanych sterowników, współczynniki harmonicznej podstawowej zmiennych stanu i uśrednionych zmiennych stanu oraz parametry badanych układów.

## 1.4. Założenia

W pracy przyjęto następujące założenia upraszczające:

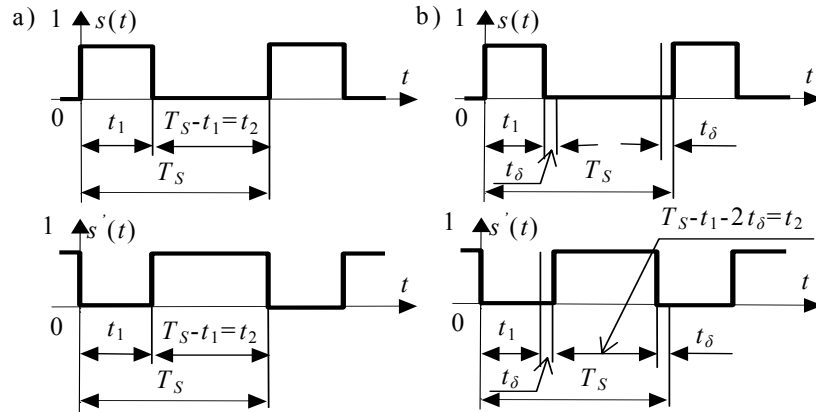
- 1) Łączniki są idealne, tzn. mają zerową wartość rezystancji w stanie włączenia i nieskończoną w stanie wyłączenia, a zmiana stanu występuje bez zwłoki czasowej, jak pokazano na rysunkach 1.2 oraz 1.3.
- 2) Funkcje przełączania łącznika idealnego o sterowaniu typu PWM z "czasem martwym" mają przebiegi czasowe pokazane na rys. 1.2b.
- 3) Funkcje przełączania łącznika idealnego o sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym mają przebiegi czasowe pokazane na rys. 1.3.
- 4) Układy są zasilane przez idealne źródła napięcia przemiennego.
- 5) Obciążenie jest liniowe i symetryczne.
- 6) Sterowanie łączników jest synchroniczne, tzn. zachodzi zależność:

$$T_s / T \equiv \omega / \omega_s \in N, \quad (1.1)$$

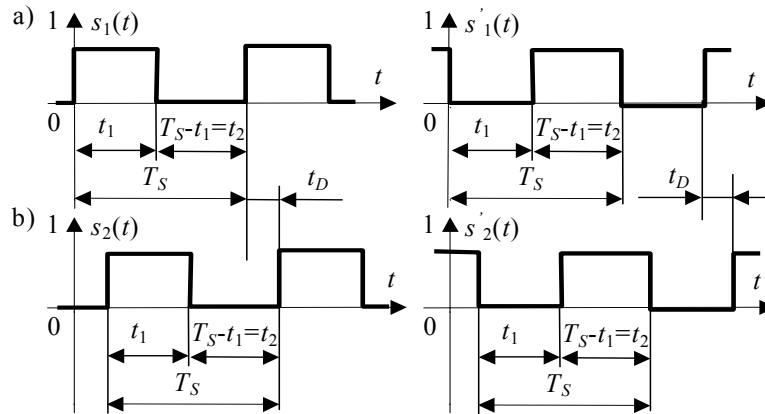
- 7) Transformator idealny ma następujące parametry [137]:

$$R_1 = R_2 = 0; L_1 = \infty; L_2 = \infty; M = \infty; K = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} = 1 \quad (1.2)$$

- 8) Idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów to przebiegi czasowe harmonicznego podstawowej.



Rys. 1.2. Przykładowe przebiegi czasowe funkcji stanu łączników idealnych przy sterowaniu typu PWM, a) bez "czasu martwego", b) z "czasem martwym"  
 $s(t)$ ,  $s'(t) = 1 - s(t)$  – funkcje przełączania łączników idealnych,  $t_1$  – czas włączenia,  $T_S$  – okres przełączania,  $t_\delta$  – "czas martwy"



Rys. 1.3. Przykładowe przebiegi czasowe funkcji stanu łączników idealnych przy sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym, a) dla łączników po stronie pierwotnej, b) dla łączników po stronie wtórnej transformatora izolującego  
 $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ ,  $s'_1(t) = 1 - s_1(t)$ ,  $s'_2(t) = 1 - s_2(t)$ , – funkcje przełączania łączników idealnych  
 $t_1$  – czas włączenia,  $T_S$  – okres przełączania,  $t_D$  – czas opóźnienia