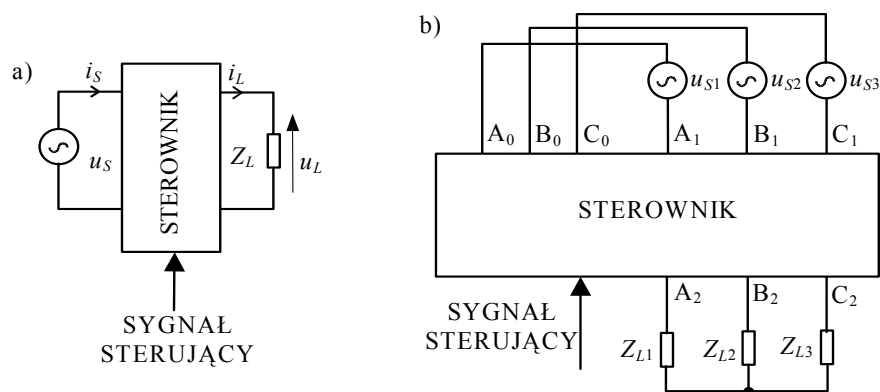


Rozdział 2

Topologie

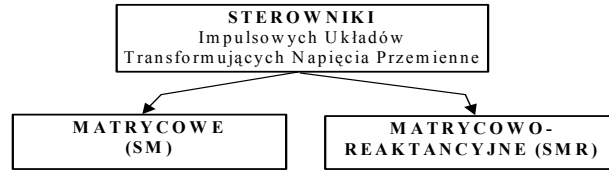
2.1. Wprowadzenie

Jak już o tym wspomniano w podrozdziale 1.1, impulsowe układy transformujące napięcia przemiennie umożliwiają zmianę napięcia, a przez to prądu oraz mocy obciążeni, bez zmiany częstotliwości jego harmonicznej podstawowej. Schematy blokowe takich układów pokazano na rys. 2.1. Przekształtnik realizujący zmianę napięcia obciążenia nazwano *sterownikiem*. Nazwę sterownik, o czym już również wspomniano (podrozdział 1.1), wprowadzono w celu wyraźnego odróżnienia mniejszego zakresu funkcjonalnego przekształtników stosowanych w omawianych układach od zakresu funkcjonalnego bezpośrednich przekształtników matrycowych AC/AC.

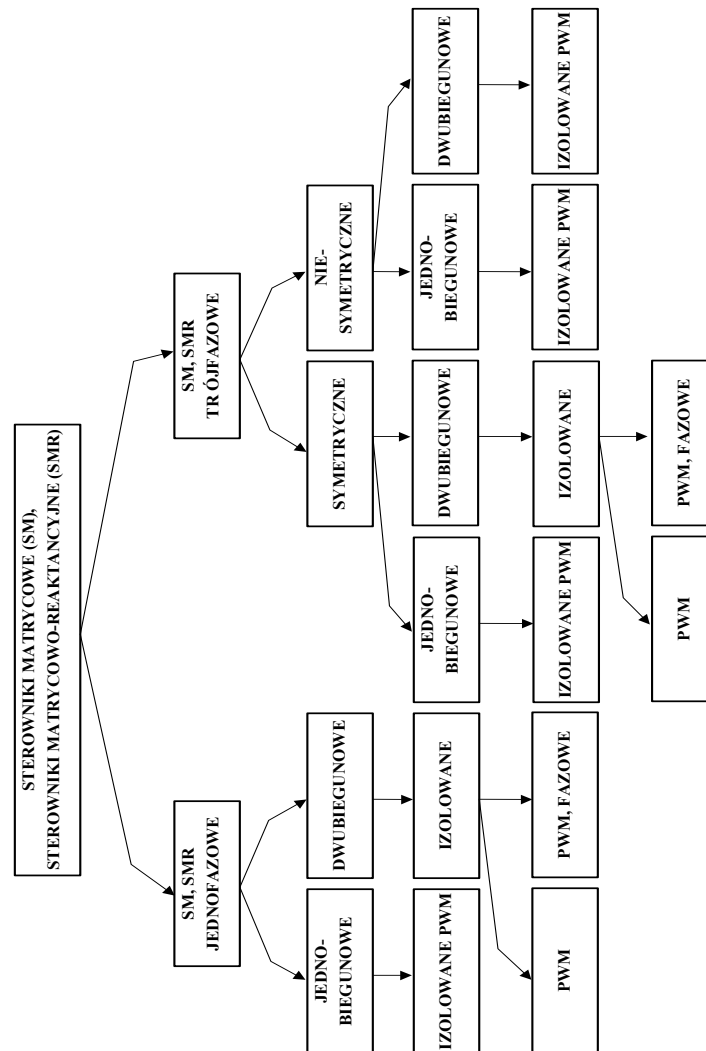


Rys. 2.1. Impulsowe układy transformujące napięcia przemiennie, a) jednofazowy, b) trójfazowy

Propozycję systematyki sterowników stosowanych w impulsowych układach transformujących napięcia przemiennie, którą przyjęto w monografii, ilustrują rysunki 2.2 oraz 2.3.



Rys. 2.2. Ogólny podział sterowników stosowanych w impulsowych układach transformujących napięcia przemienne



Rys. 2.3. Schemat blokowy systematyki sterowników stosowanych w impulsowych układach transformujących napięcia przemienne

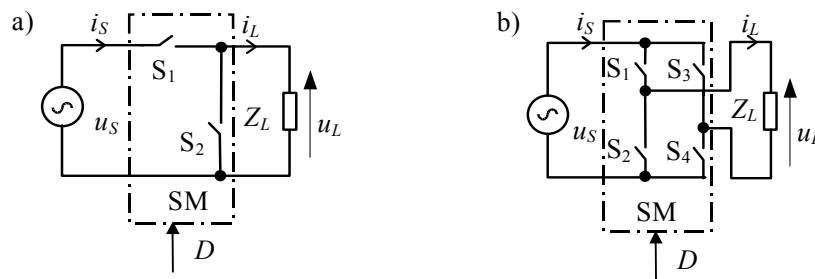
Sterowniki stosowane w omawianych układach dzielą się na sterowniki matrycowe (SM) oraz sterowniki matrycowo-reaktancyjne (SMR). Topologie SM bazują na topologiach przekształtnika singularnego (jednofazowe) [153], oraz przekształtnika matrycowego o zredukowanej ilości łączników (trójfazowe) [55], [155]. Topologie sterowników SMR bazują na topologiach przekształtników DC/DC. SMR jednofazowe są budowane poprzez zastąpienie łączników jednokierunkowych i diod łącznikami dwukierunkowymi. Zestawienie topologii SMR jednofazowych, w którym wykorzystano zestawienie topologii przekształtników DC/DC przedstawione w pracy [149], zamieszczono w dodatku A. SMR trójfazowe są budowane przez połączenie topologii jednofazowych. W dalszym podziale wyróżnia się SM oraz SMR jedno- i dwubiegunowe (rys. 2.3), a wyróżnikiem jest, jak już o tym wspomniano (podrozdz. 1.2), biegunowość harmonicznej podstawowej napięcia obciążenia.

Topologie i realizacje układowe SM oraz SMR były przedmiotem wielu prac omówionych wcześniej w podrozdziale 1.2. Układy z SM lub SMR, przedstawione w tym rozdziale były przedmiotem prac własnych autora [16] – [22] oraz prac zespołowych z udziałem autora [23] – [42], [44], [51], [68], [71], [78] – [87], [116], [118] – [129], [131] – [133], [147].

2.2. Układy matrycowe

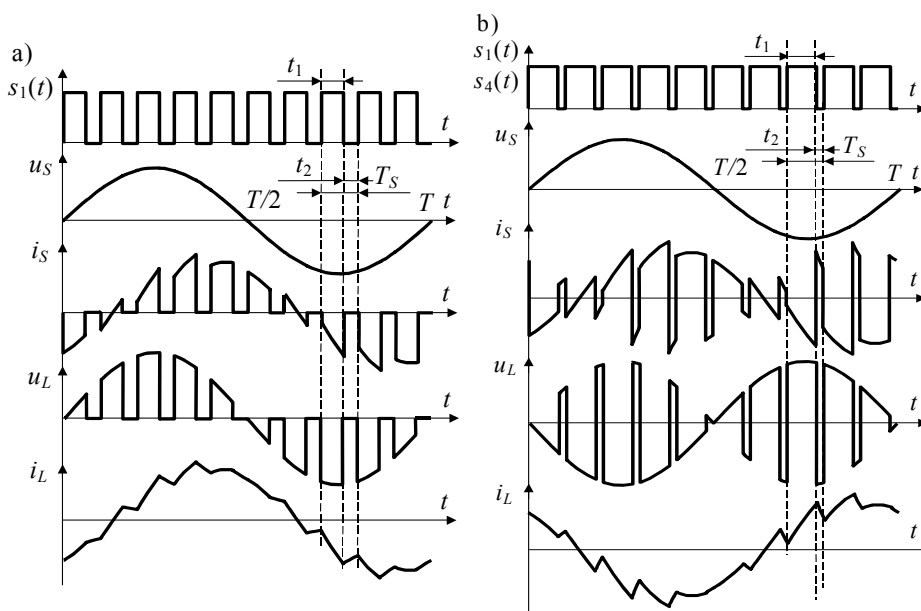
2.2.1. Sterowniki matrycowe

Schematy zastępcze najprostszych impulsowych układów transformujących napięcie przemiennie pokazano na rys. 2.4. Są to układy jednofazowe z modelami obwodowymi SM z łącznikami idealnymi (podrozdz. 1.4, p.1) [12], [153]. Działanie tych układów, przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym (RL), ilustrują przebiegi czasowe pokazane na rys. 2.5.



Rys. 2.4. Układy jednofazowe z modelami obwodowymi SM z łącznikami idealnymi, a) z SM jednobiegunowym, b) z SM dwubiegunowym

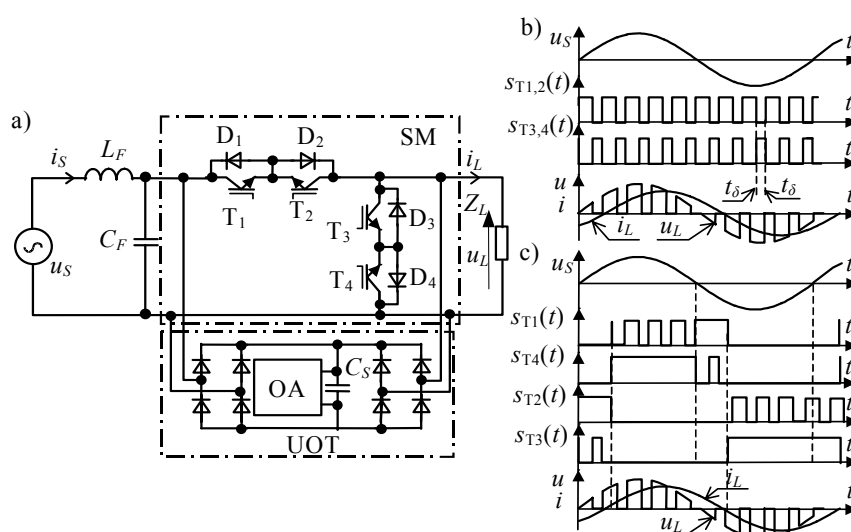
SM jednobiegunowy (rys. 2.4a) składa się z dwóch łączników, łącznika źródła S_1 i łącznika obciążenia S_2 . Łącznik źródła przyłącza źródło zasilania do obciążenia, a łącznik obciążenia umożliwia przepływ prądu obciążenia po odłączeniu źródła zasilania. W czasie t_1 do obciążenia jest przyłączane napięcie źródła u_S za pomocą łącznika źródła S_1 . Wówczas energia elektryczna jest dostarczana ze źródła do obciążenia lub odwrotnie. W czasie t_2 łącznik źródła jest wyłączony, napięcie obciążenia u_L ma wartość równą zero, a prąd obciążenia i_L jest podtrzymywany za pomocą włączonego łącznika obciążenia S_2 . Podczas pracy układu jest zmieniana wartość współczynnika wypełnienia impulsu $D = t_1/T_S$, który spełnia funkcję wielkości sterującej.



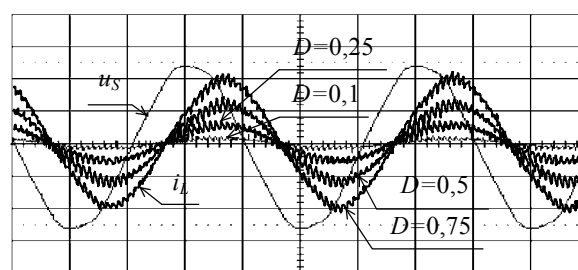
Rys. 2.5. Przykłady przebiegów czasowych napięć i prądów w układach z SM, a) jednobiegunowym (rys. 2.4a) dla $D = 0,6$, b) dwubiegunowym (rys. 2.4b) dla $D = 0,8$; $D = t_1 / T_S$ – współczynnik wypełnienia impulsu

SM dwubiegunowy (rys. 2.4b) ma cztery łączniki w pełni wyłączalne $S_1 - S_4$. Łączniki S_1, S_4 oraz łączniki S_2, S_3 przyłączają na przemian źródło zasilania do obciążenia. Umożliwia on zmianę biegunowości napięcia przyłączanego do obciążenia. W czasie t_1 do obciążenia jest przyłączane napięcie źródła zasilającego u_S za pomocą łączników S_1, S_4 . Następnie w czasie t_2 do obciążenia jest przyłączane napięcie źródła o odwrotnej polaryzacji $-u_S$ za pomocą łączników S_2, S_3 . W obydwu przedziałach czasu energia elektryczna jest dostarczana ze źródła do obciążenia lub odwrotnie. Podobnie jak w układzie jednobiegunowym wielkością sterującą jest współczynnik wypełnienia impulsu D .

Przykład realizacji układowej SM jednobiegunowego pokazano na rys. 2.6, natomiast oscylogramy wybranych przebiegów prądu obciążenia w tym układzie pokazano na rys. 2.7. [25], [27]. W przypadku stosowania sterowania typu PWM z “czasem martwym” (rys. 1.2b), w którym wszystkie tranzystory w układzie są wyłączone, w omawianym układzie występują przebiegi powodowane zjawiskiem samoindukcji. Korzystniejsze rozwiązanie ochrony przebiegowej w tym układzie, zaproponowane w pracy [91] (układ regeneracyjny), jest pokazane na rys. 2.8. Takie rozwiązanie umożliwia ochronę przebiegową z odzyskiwaniem energii elektrycznej gromadzonej w kondensatorach C_S i C_F podczas komutacji.

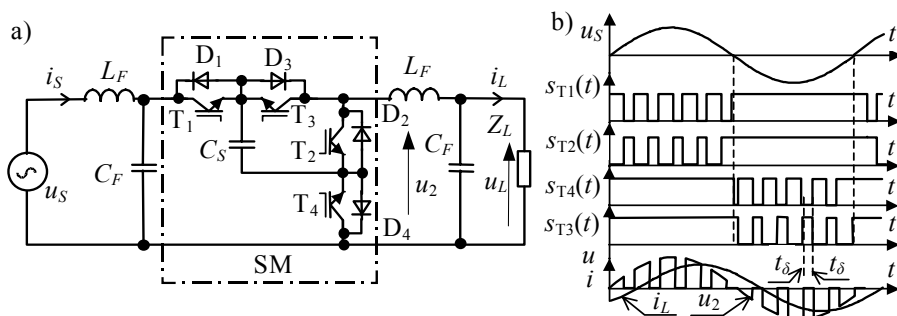


Rys. 2.6. Układ z SM jednobiegunowym, a) schemat ideowy, b) przykładowe przebiegi czasowe przy sterowaniu z “czasem martwym” t_δ (rys. 1.2b), c) przykładowe przebiegi czasowe przy sterowaniu bez “czasu martwego”; OA – obciążenie aktywne, UOT – układ obejściowo-tłumiący

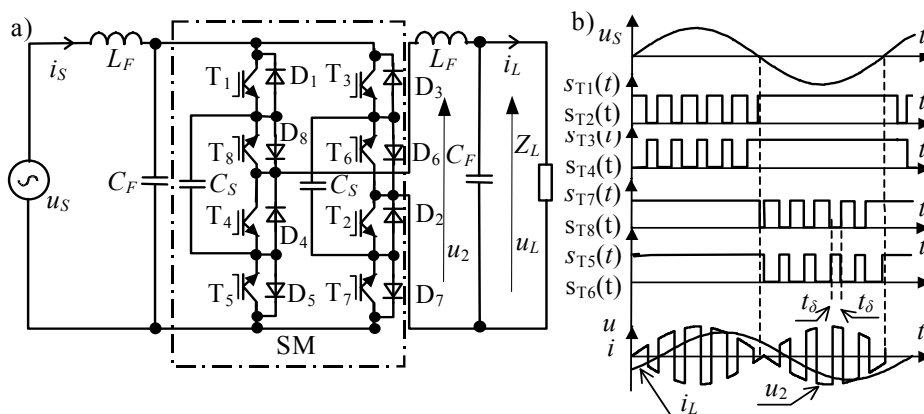


Rys. 2.7. Oscylogramy prądu obciążenia w układzie jak na rys. 2.6 przy sterowaniu z “czasem martwym” dla $f_S = 1$ kHz; $X = 5$ ms/dz., $Y_1 = 50$ V/dz., $Y_2 = 0,5$ A/dz.

Przykład realizacji układowej SM dwubiegunowego oraz oscylogramów napięć w tym układzie, które zaczerpnięto z pracy [61] (praca dyplomowa wykonana pod kierunkiem autora), pokazano na rysunkach 2.9 oraz 2.10.

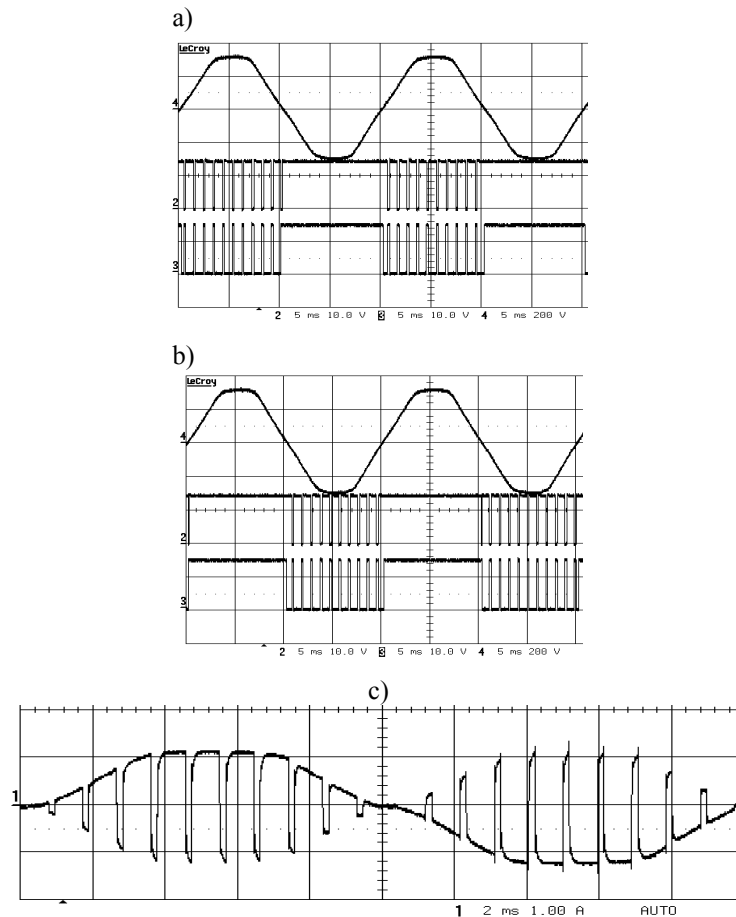


Rys. 2.8. Układ z SM jednobiegunowym, a) schemat ideowy, b) przykładowe przebiegi czasowe; t_δ - "czas martwy" (rys. 1.2b)



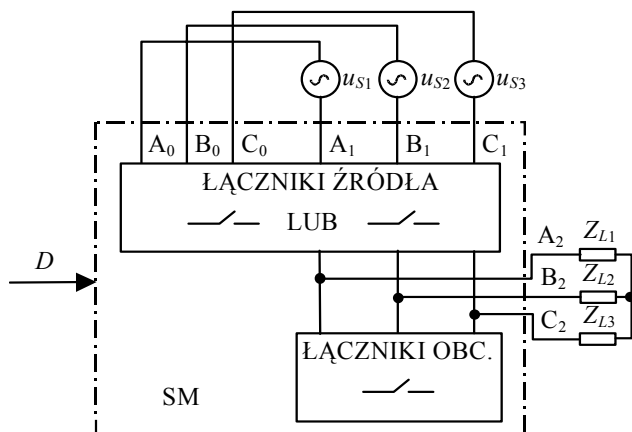
Rys. 2.9. Układ z SM dwubiegunowym, a) uproszczony schemat ideowy, b) przebiegi czasowe sygnałów sterujących; t_δ - "czas martwy" (rys. 1.2b)

W omawianych układach, oprócz SM, są zwykle stosowane wejściowe oraz wyjściowe filtry pasywne LC , jak jest to pokazane na rysunkach rys. 2.6, rys. 2.8 oraz rys. 2.9. Są one stosowane w celu zmniejszenia odkształceń (wyeliminowania wyższych harmonicznych) napięcia obciążenia oraz prądu źródła. Szczegółowa analiza doboru parametrów filtrów jest najszerzej przedstawiona w pracach [47] – [49]. Ponadto, zarówno w układach o sterowaniu PWM z "czasem martwym" jak i bez "czasu martwego" są stosowane lokalne i globalne układy do ochrony przepięciowej, których rozwiązania pokazano odpowiednio na rysunkach rys. 2.8, rys. 2.9 (C_S i C_F) oraz rys. 2.6 (UOT) [27], [91], [126], [134].

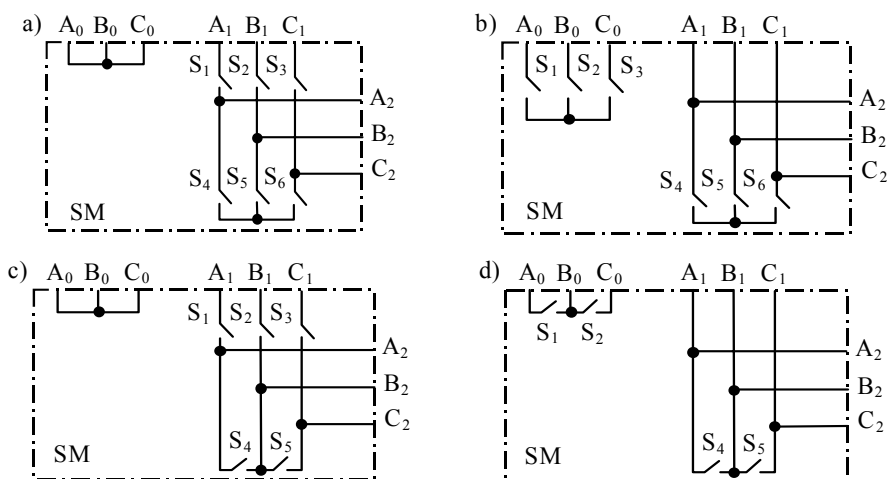


Rys. 2.10. Oscylogramy w układzie pokazanym na rys. 2.9 dla $D = 0,8$ [61],
 a) napięcia zasilania i sygnałów sterujących tranzystory $T_1 - T_4$, b) napięcia zasilania i sygnałów sterujących tranzystory $T_5 - T_8$, c) napięcia wyjściowego u_2

Ogólny schemat blokowy układów trójfazowych z SM jednobiegunowymi pokazano na rys. 2.11. Topologie trójfazowych SM jednobiegunowych symetrycznych i niesymetrycznych, w których wykorzystano modele obwodowe z łącznikami idealnymi (podrozdz. 1.4, p.1)), pokazano na rysunkach 2.12 – 2.15. Jest istotne, że topologie SM symetrycznych pokazane na rysunkach rys. 2.12b, d, rys. 2.13b, d, g, h, i, j oraz rys. 2.14c, d, e, f wymagają dostępu do wszystkich zacisków fazowych źródła napięcia zasilania. Pozostałe topologie SM symetrycznych oraz niesymetrycznych mogą być stosowane w układach trójfazowych zasilanych z typowej sieci przemysłowej wymagają dostępu do trzech zacisków fazowych źródeł napięcia zasilania.

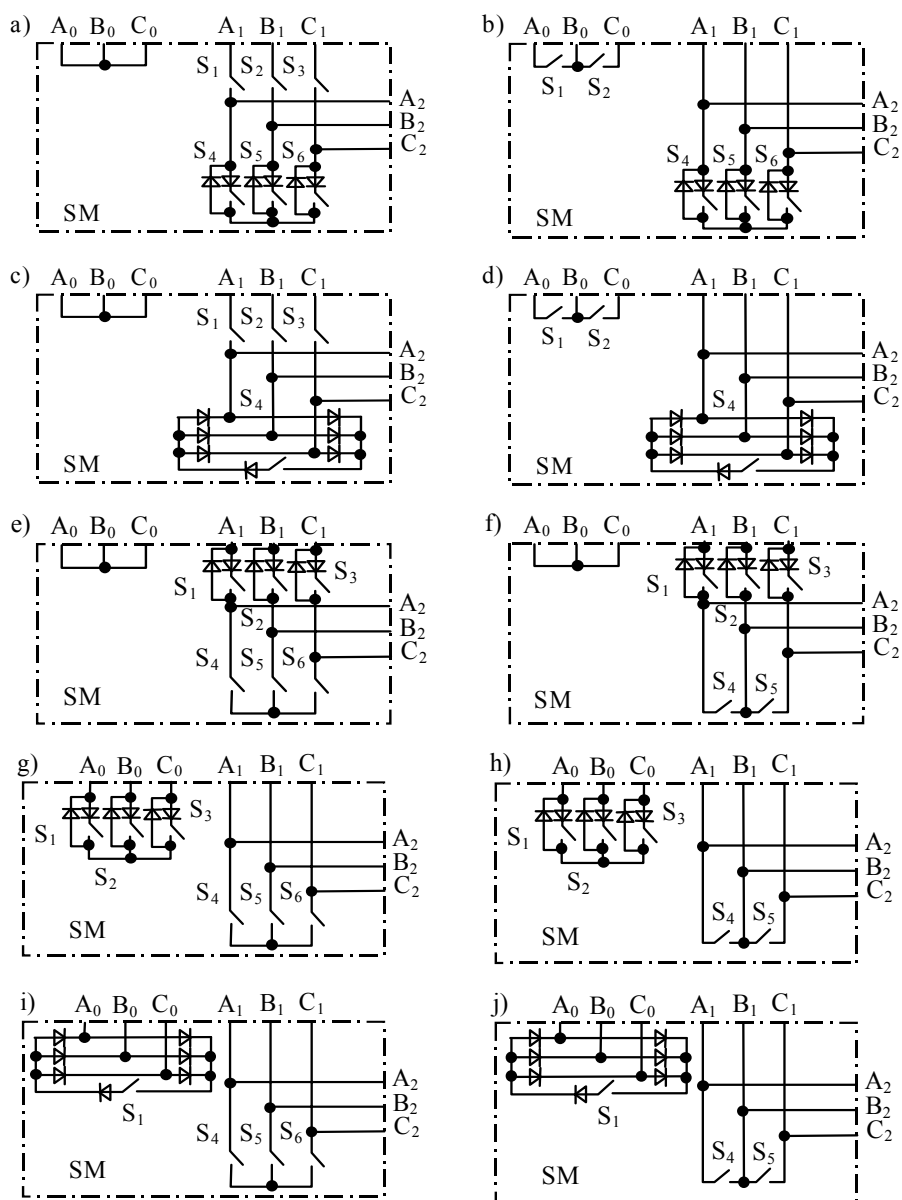


Rys. 2.11. Ogólny schemat blokowy układów trójfazowych z SM jednobiegunowymi



Rys. 2.12. Topologie SM jednobiegunowych symetrycznych z: a), b) 3+3, c) 3+2, d) 2+2 łącznikami dwukierunkowymi

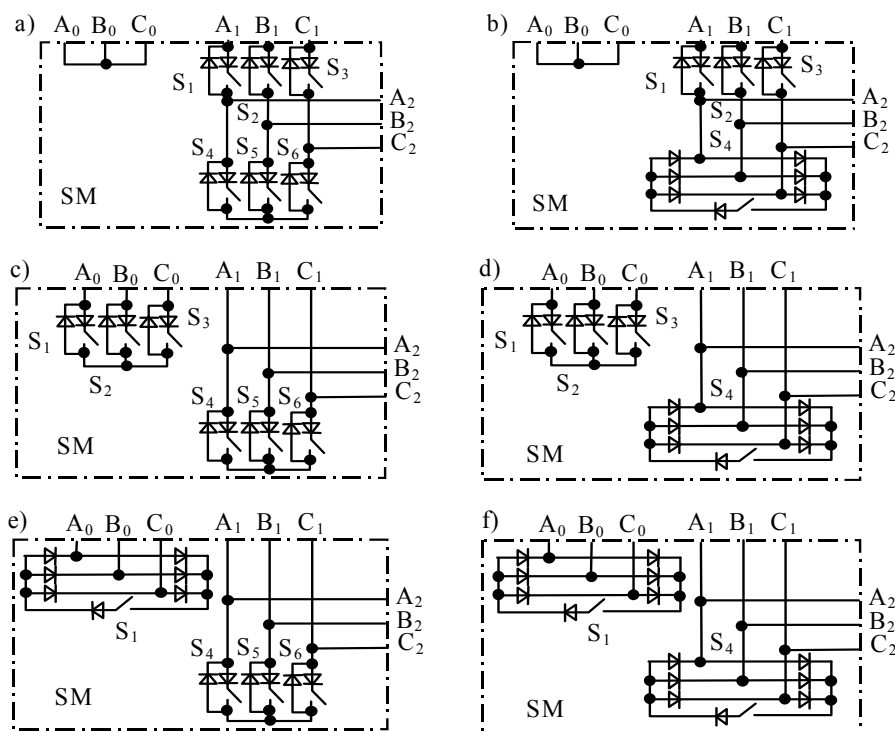
Podstawowym kryterium stosowanym przy ocenie użyteczności topologii pokazanych na rysunkach 2.12 – 2.15 jest ocena wartości wewnętrznych strat mocy, które występują podczas przewodzenia oraz komutacji łączników stosowanych w tych topologiach. Wartość tych strat mocy jest zależna od ilości stosowanych łączników oraz częstotliwości przełączania f_s . Szczegółowa analiza wewnętrznych strat mocy omawianych topologii jest przedstawiona w pracach [16], [27], [119], [123] oraz [124].



Rys. 2.13. Topologie SM jednofazowych symetrycznych z: a), e), g) 3+3, b) 2+3, f), h) 3+2, c) 3+1, d) 2+1, i) 1+3, j) 1+2 łącznikami dwu- i jednokierunkowymi

Spośród topologii SM, które wymagają dostępu do trzech zacisków fazowych źródeł zasilających, najbardziej efektywne są topologie pokazane na ry-

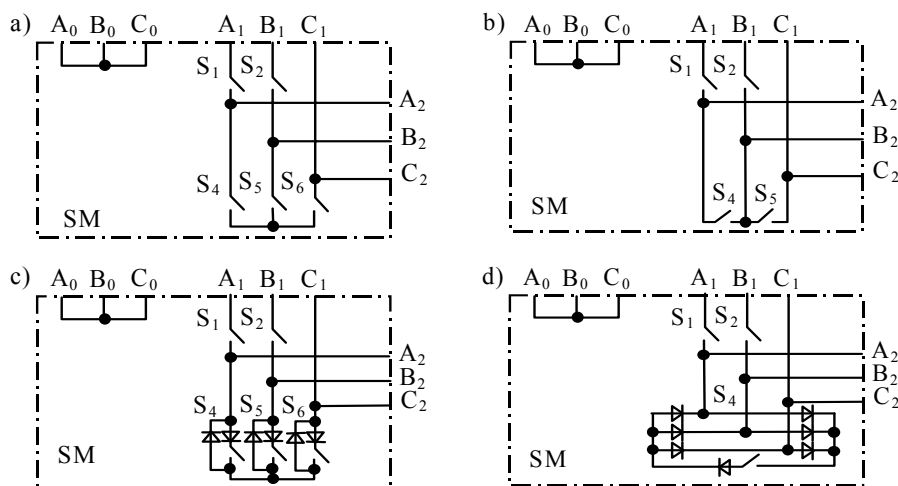
sunkach 2.14a oraz b. W następnej kolejności są topologie SM pokazane na rysunkach rys. 2.15c, rys. 2.13f, rys. 2.15d oraz rys. 2.15b. Spośród topologii SM, które wymagają dostępu do wszystkich zacisków fazowych źródeł zasilających, najbardziej efektywna jest topologia pokazana na rys. 2.14f. Układ o tej topologii jest łatwy w realizacji przy wykorzystaniu transformatora separującego, który daje dodatkowo izolację galwaniczną [147]. Realizacja takiego układu jest omawiana dalej (porozdz. 2.2.2) i pokazana na rys. 2.26.



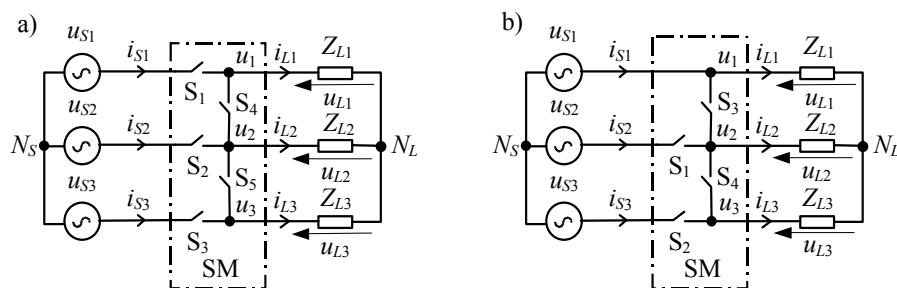
Rys. 2.14. Topologie SM jednobiegunowych symetrycznych z a), c) 3+3, b), d) 3+1, e) 1+3, f) 1+1 łącznikami jednokierunkowymi

Wszystkie topologie SM jednobiegunowych (rysunki 2.12 – 22.15) można analizować za pomocą dwóch schematów zastępczych, które pokazano na rys. 2.16. Układ z SM symetrycznym (rys. 2.16a) składa się z trzech łączników źródła $S_1 - S_3$ i dwóch łączników obciążenia S_4, S_5 . Łączniki źródła przyłączają poszczególne fazy źródła zasilania do obciążenia, a łączniki obciążenia umożliwiają przepływ prądów obciążenia po odłączeniu źródła zasilania. Drugi układ, pokazany na rys. 2.16b, ma tylko dwa łączniki źródła S_1, S_2 przyłączające dwie fazy źródła zasilania do obciążenia. Jedna faza źródła zasilania jest połączona bezpośrednio z obciążeniem. Łączniki obciążenia S_3, S_4 , podobnie

jak w układzie symetrycznym, pozwalają na przepływ prądów obciążenia po odłączeniu źródła zasilania.



Rys. 2.15. Topologie SM niesymetrycznych z a) 2+3, b) 2+2 łącznikami dwukierunkowymi oraz z c) 2+3, d) 2+1 łącznikami jedno- i dwukierunkowymi

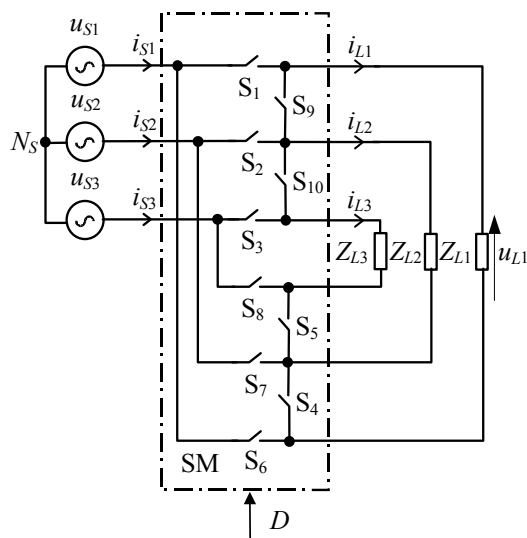


Rys. 2.16. Schematy zastępcze trójfazowych układów z SM jednobiegunowymi, a) układ z SM symetrycznym, b) układ z SM niesymetrycznym

Działanie układu z SM symetrycznym (rys. 2.16a) jest podobne do działania układu jednofazowego, opisanego wcześniej (rys. 2.5a). Należy tylko uwzględnić przesunięcie fazowe występujące w poszczególnych fazach układu. Na rys. 2.18a pokazano przebiegi czasowe napięć i prądów ilustrujące działanie układu z SM niesymetrycznym (rys. 2.16b). W tym układzie fazowe źródło napięcia zasilania u_{S1} jest połączone bezpośrednio z obciążeniem Z_{L1} . W czasie t_1 do pozostałych faz obciążenia są przyłączane fazowe źródła u_{S2} , u_{S3} za pomocą łączników źródła S_1 , S_2 . Energia elektryczna jest wówczas dostarczana ze źródła do obciążenia lub odwrotnie. W czasie t_2 łączniki źródła są wy-

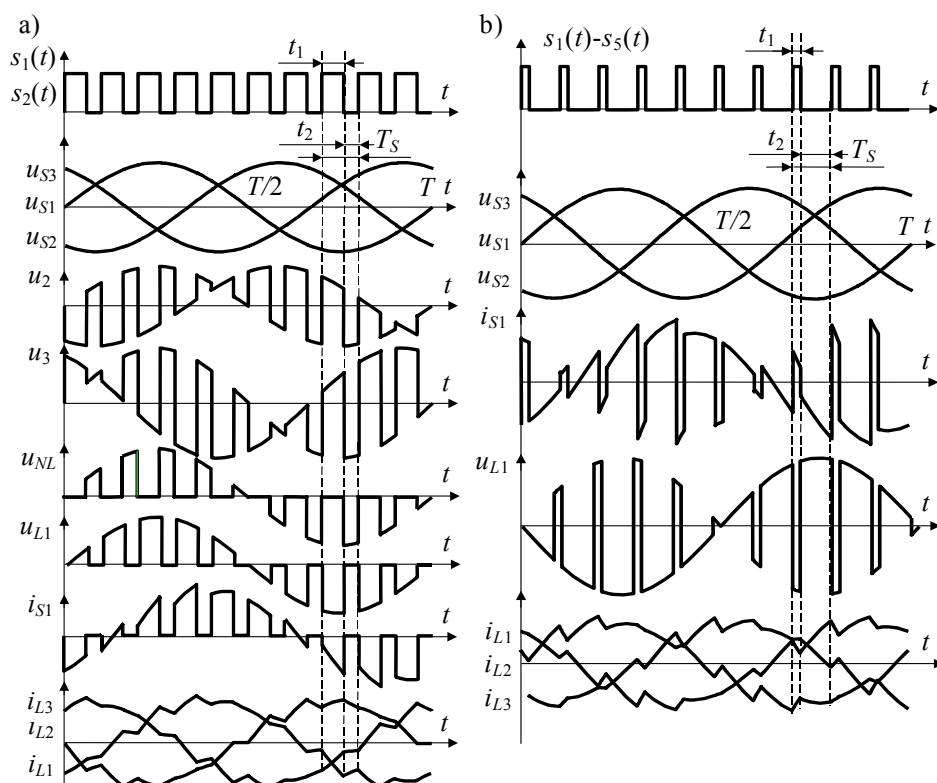
łączone, napięcia fazowe obciążenia mają wartość równą zero, a prądy fazowe obciążenia są podtrzymywane za pomocą włączonych łączników obciążenia S_3 , S_4 .

Schemat zastępczy trójfazowego układu z SM dwubiegunowym pokazano na rys. 2.17. Przykładowe przebiegi czasowe ilustrujące działanie tego układu pokazano na rys. 2.18b. W czasie t_1 do obciążenia są przyłączane napięcia fazowe źródła u_{S1} , u_{S2} , u_{S3} za pomocą łączników $S_1 - S_5$, przy czym łączniki S_4 , S_5 zwierają końce obciążenia fazowych. Następnie w czasie t_2 łączniki $S_1 - S_5$ są wyłączane, a do obciążenia są przyłączane napięcia fazowe źródła o odwrotnej polaryzacji $-u_{S1}$, $-u_{S2}$, $-u_{S3}$ za pomocą łączników S_6, S_{10} . Końce obciążenia fazowych są wówczas zwierane za pomocą łączników S_9, S_{10} . W obydwu przedziałach czasu energia elektryczna jest dostarczana ze źródła do obciążenia lub odwrotnie. Podobnie jak w układzie dwubiegunowym jednofazowym (rys. 2.4b) wielkością sterującą jest współczynnik wypełnienia impulsu D . Omawiana topologia SM jest wykorzystywana właściwie tylko w połączeniu z transformatorem dodawczym w trójfazowych stabilizatorach napięcia przemiennego. Jest to wówczas układ z SM izolowanym, omawiany dalej w podrozdziale 2.2.2 (rys. 2.28).



Rys. 2.17. Schemat zastępczy układu trójfazowego z modelem obwodowym SM dwubiegunowego z łącznikami idealnymi

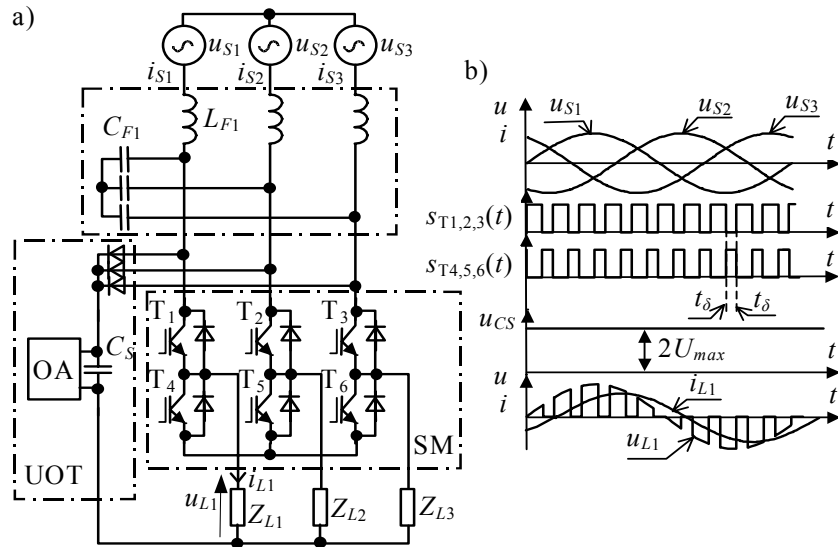
Przykład realizacji układowej trójfazowego SM jednobiegunowego symetrycznego z globalnym układem ochrony przepięciowej (UOT) oraz oscylogramy napięć i prądów uzyskane w tym układzie pokazano na rysunkach 2.19 – 2.21 [16], [27], [119], [120], [123], [126].



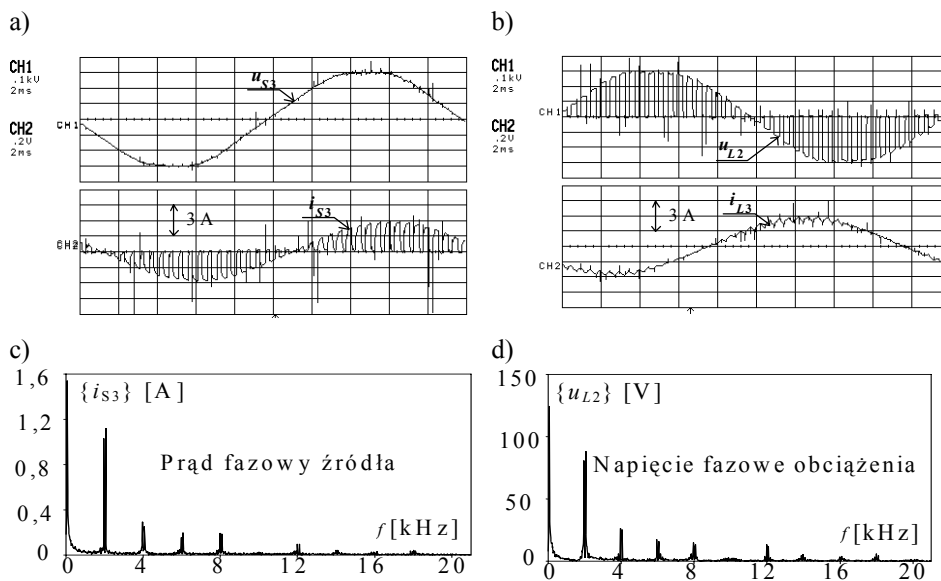
Rys. 2.18. Przebiegi czasowe napięć i prądów w trójfazowym układzie z SM, a) jednobiegunowym niesymetrycznym (rys. 2.16b) dla współczynnika wypełnienia impulsu $D = 0,6$, b) dwubiegunowym symetrycznym (rys. 2.17) dla $D = 0,2$

Przykład realizacji układowej trójfazowego SM jednobiegunowego z regeneracyjnym układem ochrony przepięciowej pokazano na rys. 2.22 [19], [91]. W tym układzie jest realizowana ochrona przepięciowa z odzyskiwaniem energii elektrycznej gromadzonej w kondensatorach C_S i C_F podczas komutacji. Taki sposób ochrony przepięciowej był już przedstawiony wcześniej podczas omawiania układu pokazanego na rys. 2.8. Omawiany układ wymaga formowania sygnałów sterujących łączniki, zależnie od polaryzacji międzyfazowych napięć zasilania (rys. 2.22b).

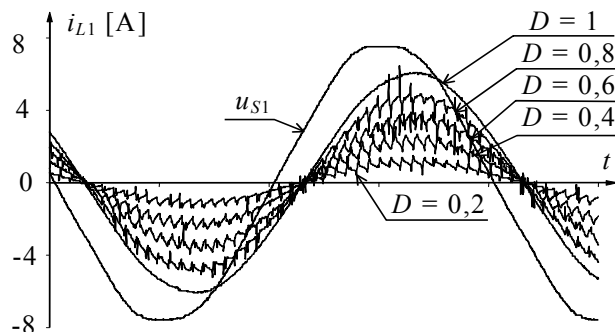
Realizację układową trójfazowego SM niesymetrycznego jednobiegunowego pokazano na rys. 2.23. W tym układzie w wersji sterowania typu PWM bez “czasu martwego” (rys. 2.23c) liczba komutacji jest ok. 2-krotnie mniejsza niż przy najprostszym sterowaniu typu PWM z “czasem martwym” [23], [27], [118], [122], [125].



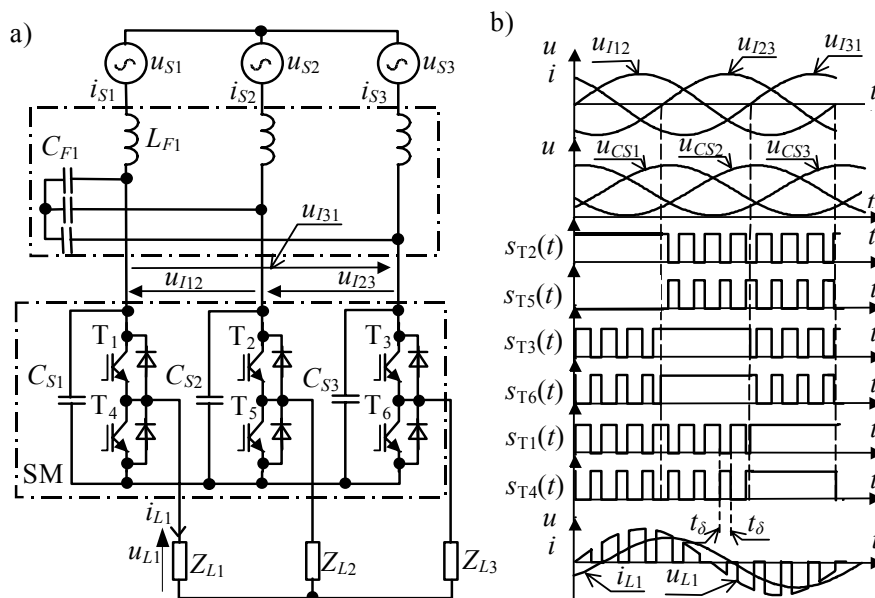
Rys. 2.19. Układ z SM symetrycznym jednobiegunowym o topologii z 3+3 łącznikami typu tranzystor-dioda, a) schemat ideowy, b) charakterystyczne przebiegi czasowe; UOT – układ obejściowo-tłumiący, OA – obciążenie aktywne, t_δ – “czas martwy”



Rys. 2.20. Oscylogramy w układzie z rys. 2.19 bez filtra wejściowego dla $f_s = 2$ kHz, $D = 0,6$, $I_{Lmax} = 4,5$ A ($\cos\phi_L = 0,85$), a) napięcia i prądu fazowego źródła, b) napięcia i prądu fazowego obciążenia, c), d) widma prądu fazowego źródła oraz napięcia fazowego obciążenia

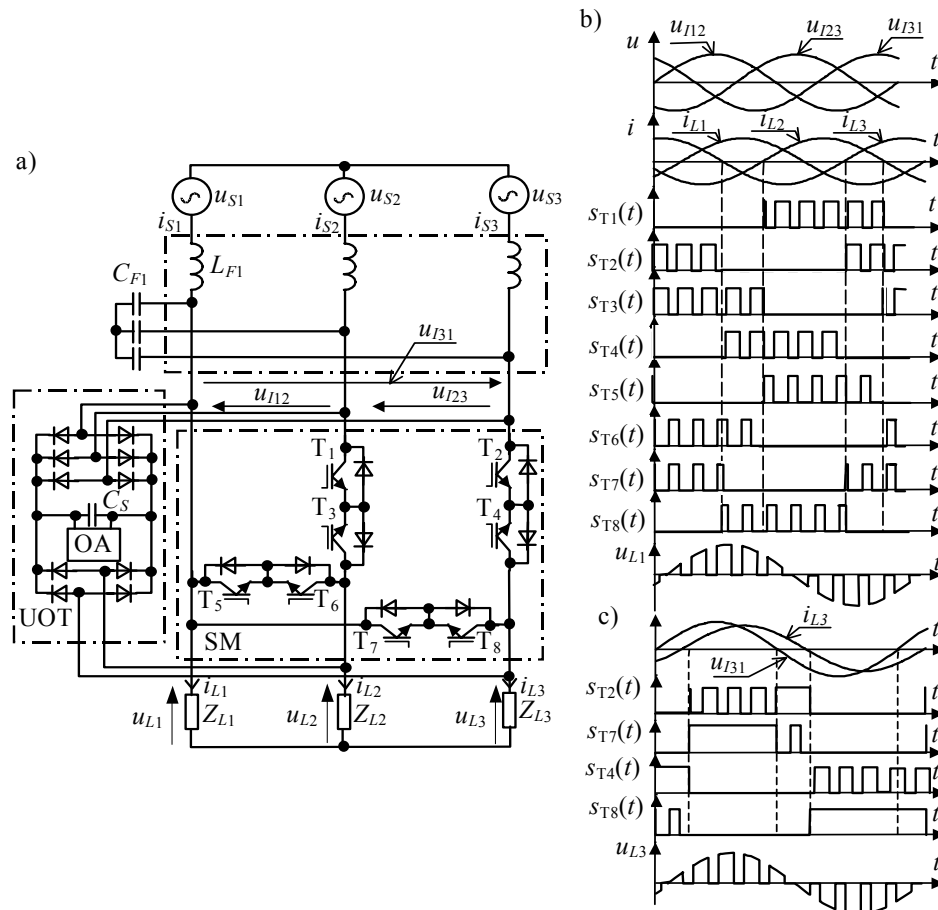


Rys. 2.21. Zestawienie oscylogramów prądu obciążenia uzyskanych w układzie pokazanym na rys. 2.19 dla $f_S = 2 \text{ kHz}$, $I_{Lmax} = 4,5 \text{ A}$ ($\cos\varphi_L = 0,85$)



Rys. 2.22. Układ z SM symetrycznym jednobiegunowym o topologii z 3+3 łącznikami typu tranzystor-dioda oraz regeneracyjnym układem ochrony przepięciowej (C_{S1} , C_{S2} , C_{S3}), a) schemat ideowy, b) charakterystyczne przebiegi czasowe; t_δ - "czas martwy"

W układach trójfazowych z SM są stosowane wejściowe oraz wyjściowe filtry pasywne LC , podobnie jak w układach jednofazowych, które omawiano wcześniej.



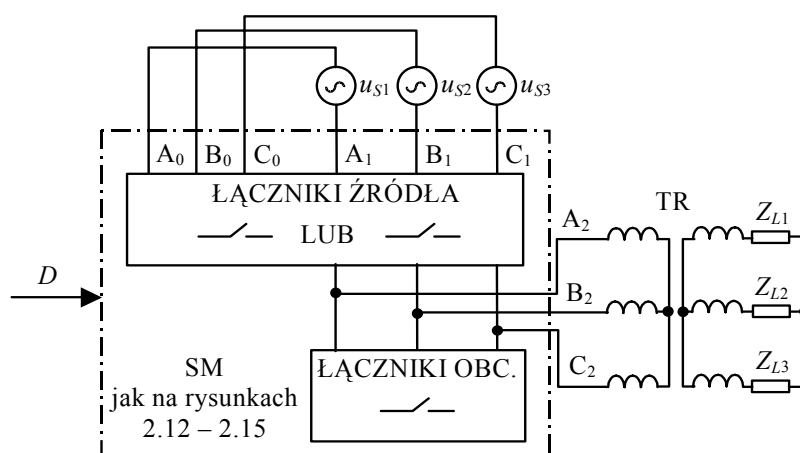
Rys. 2.23. Układ z SM niesymetrycznym jednobiegunowym o topologii z 2+2 łącznikami typu dwa tranzystory-dwie diody, a) schemat ideowy, b) charakterystyczne przebiegi czasowe przy sterowaniu bez "czasu martwego" z identyfikacją prądów obciążenia i_{L2} , i_{L3} , c) przykładowe przebiegi czasowe (dla jednej fazy) przy sterowaniu bez "czasu martwego" z identyfikacją prądów obciążenia i_{L2} , i_{L3} , oraz napięć u_{J31} , u_{J12}

2.2.2. Sterowniki matrycowe izolowane

Sterowniki matrycowe izolowane dzielą się na dwie podstawowe grupy: SM izolowane o sterowaniu typu PWM oraz SM izolowane o sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym (rys. 2.3). W pierwszej grupie topologie SM izolowanych są budowane przez kaskadowe połączenie transformatora z SM. W drugiej grupie, w której wykorzystuje się dwa SM dwubiegunowe, topologie SM izolowanych są budowane przez przyłączenie jednego z SM po stronie pierwotnej, a drugiego SM po stronie wtórnej transformatora.

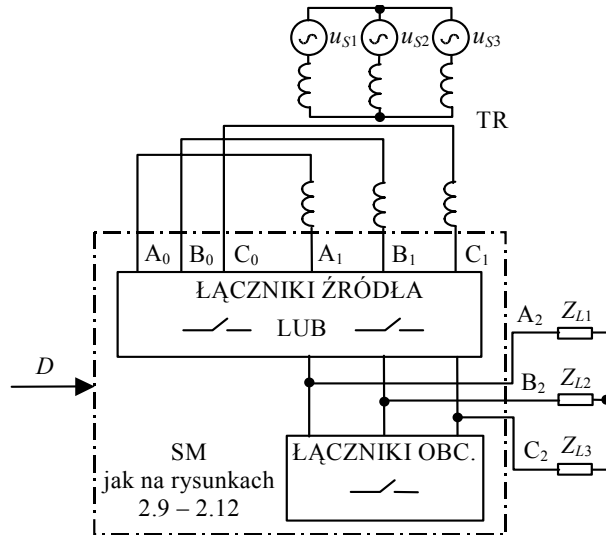
Jak już o tym wspomniano w podrozdziale 1.2, w transformatorach stosowanych w SM izolowanych należących do grupy pierwszej, częstotliwość harmonicznej podstawowej strumienia magnetycznego w rdzeniu transformatora jest taka sama jak częstotliwość napięcia zasilania (50 lub 60 Hz). W transformatorach stosowanych w SM izolowanych należących do grupy drugiej nie występuje harmoniczna o wartości częstotliwości odpowiadającej częstotliwości harmonicznej podstawowej napięcia zasilania. W tych układach występuje wysokoczęstotliwościowe transformowanie energii elektrycznej przez transformator [27], [60], [71] – [74], [76].

Topologie jednofazowe SM izolowanych jednobiegunowych o sterowaniu PWM są budowane przez kaskadowe połączenie transformatora z SM od strony źródła zasilania albo od strony obciążenia. O sposobie połączenia decydują zwykle parametry transformatora (przekładnia napięciowa) oraz kryteria konstrukcyjno-ekonomiczne (zdolność obciążeniowa łączników półprzewodnikowych oraz ich koszt). Zwykle SM jest umieszczany po tej stronie transformatora, po której występują mniejsze prądy. Topologie trójfazowych SM izolowanych jednobiegunowych o sterowaniu PWM są budowane przez połączenie transformatora trójfazowego pokazane na rysunkach 2.24 oraz 2.25. Połączenie pokazane na rys. 2.25 jest stosowane w układach wymagających dostępu do zacisku wspólnego trójfazowego źródła zasilania, np. topologia pokazana na rys. 2.14f. Jak już o tym wspomniano wcześniej (podrozdz. 2.2.1), SM izolowane dwubiegunowe są stosowane w stabilizatorach napięcia przemiennego i transformator jest w nich połączony z zaciskami wyjściowymi SM.

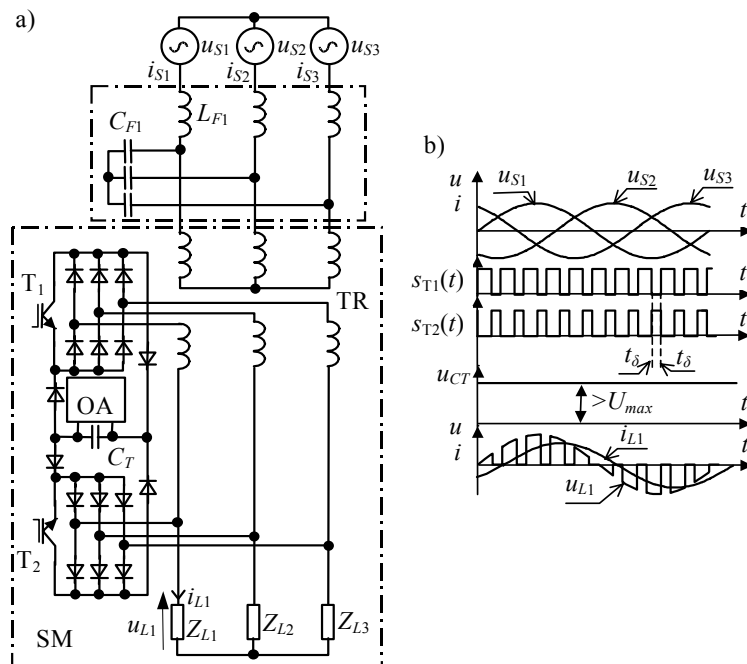


Rys. 2.24. Układy trójfazowe z SM jednobiegunowym izolowanym od strony obc.

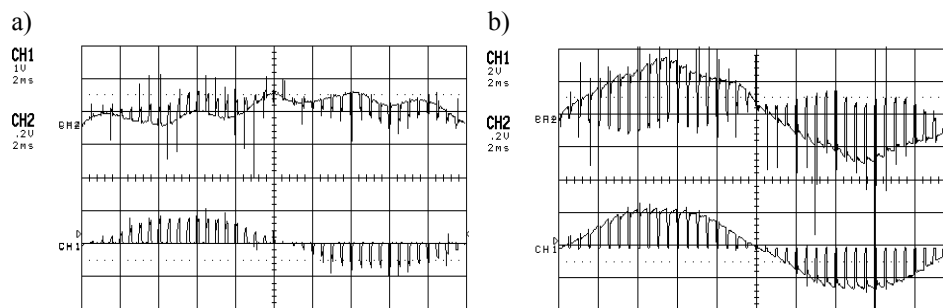
Przykład realizacji układowej trójfazowego SM jednobiegunowego izolowanego od strony źródła oraz oscylogramy prądów w tym układzie pokazano na rysunkach 2.26 oraz 2.27 [16], [27], [147].



Rys. 2.25. Układy trójfazowe z SM jednobiegunowym izolowanym od strony źródła



Rys. 2.26. Układ z SM jednobiegunowym izolowanym z 1 + 1 łącznikami typu tranzystor-trójfazowy mostek diodowy, a) schemat ideowy, b) charakterystyczne przebiegi czasowe; TR – transformator, C_T – kondensator obejściowo-tłumiący, OA – obciążenie aktywne, t_{δ} - “czas martwy” (rys. 1.2b)



Rys. 2.27. Oscylogramy prądów w układzie pokazanym na rys. 2.26, a) dla $D = 0,2$, b) dla $D = 0,8$; CH1 - prąd po stronie pierwotnej TR, CH2 – prąd po stronie wtórnej TR

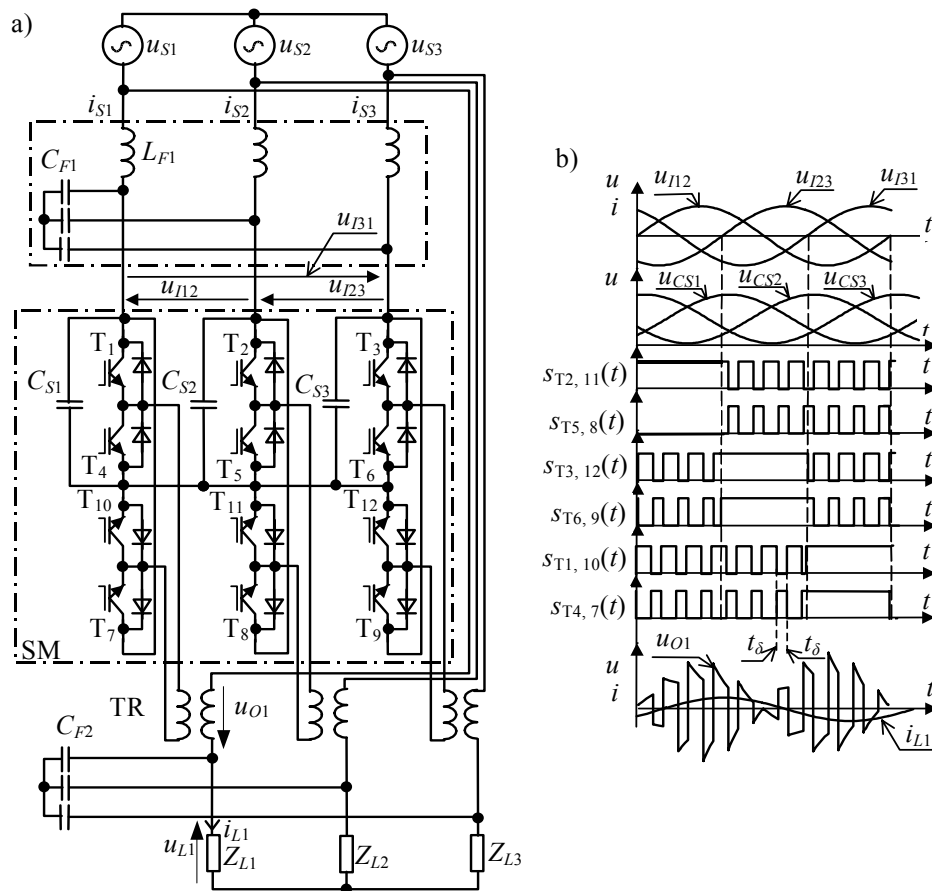
Przebiegi czasowe pokazane na rys. 2.27 pośrednio ilustrują, że wartość częstotliwości harmonicznej podstawowej prądów oraz strumienia w rdzeniu transformatora TR jest taka sama jak częstotliwość napięcia zasilającego. Przykład realizacji układowej trójfazowego SM dwubiegunowego izolowanego pokazano na rys. 2.28 [27], [51], [52]. Jest to jednocześnie przykład typowej realizacji układowej stabilizatora napięcia przemiennego, w którym zastosowano omawiane rozwiązanie SM.

Schematy zastępcze układów z SM izolowanymi o sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym, które należą do drugiej grupy SM izolowanych, pokazano na rys. 2.29. Są to schematy zastępcze z modelami obwodowymi SM z łącznikami idealnymi (podrozdz.1.4, p.1)) [60]. Układ w wersji pierwszej z 4 + 4 łącznikami (rys. 2.29a) ma transformator TR dwuuzwojeniowy oraz dwie struktury SM dwubiegunowych. Jedną złożoną z łączników $S_1 - S_4$ po stronie pierwotnej transformatora TR i drugą składającą się z łączników $S_5 - S_8$ po stronie wtórnej tego transformatora. Układ w wersji drugiej z 2 + 2 łącznikami (rys. 2.29b) ma transformator TR czterouzwojeniowy oraz dwie struktury SM dwubiegunowych o zredukowanej liczbie łączników. Dwa łączniki S_1, S_2 po stronie pierwotnej i dwa łączniki S_3, S_4 po stronie wtórnej transformatora TR. W tych układach jest stosowane sterowanie, w którym wykorzystuje się przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami sterującymi łączniki po stronie pierwotnej względem sygnałów sterujących po stronie wtórnej transformatora TR (rys. 1.3). Wielkością sterującą jest wartość współczynnika przesunięcia fazowego przebiegów czasowych sygnałów sterujących po stronie pierwotnej względem sygnałów po stronie wtórnej transformatora:

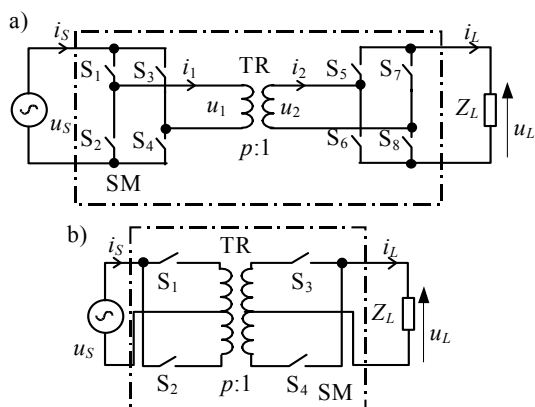
$$\alpha = \frac{t_D}{T_\theta}, \quad (2.1)$$

gdzie: $T_\theta = T_S/2$ – okres przełączania napięcia wyjściowego.

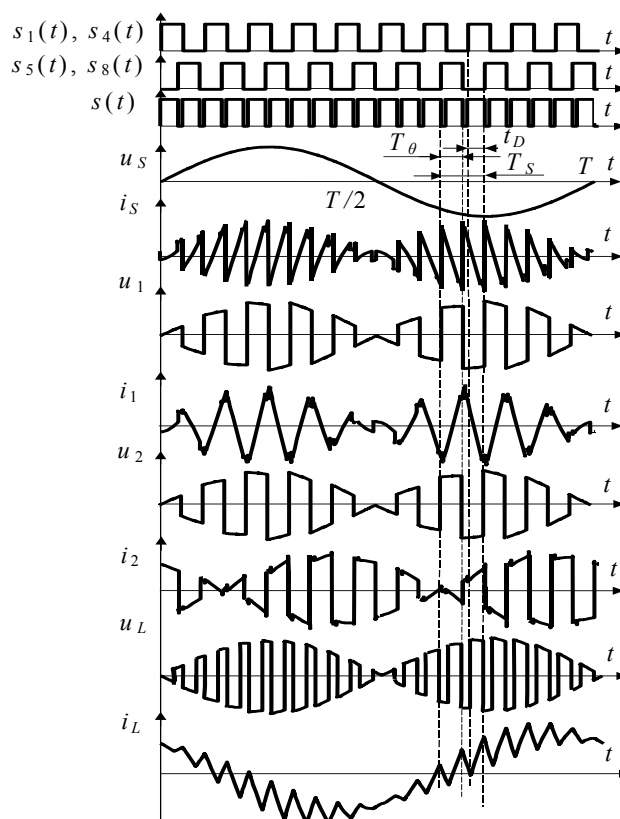
Sterowanie typu PWM z przesunięciem fazowym daje efekt w postaci wyeliminowania harmonicznej podstawowej strumienia magnetycznego w rdzeniu transformatora o częstotliwości napięcia zasilającego (50 lub 60 Hz). Działanie omawianego układu ilustrują przebiegi czasowe pokazane na rys. 2.30. Przykłady realizacji układów SM dwubiegunowych izolowanych o sterowaniu PWM z przesunięciem fazowym pokazano na rysunkach 2.31 oraz 2.32 [27], [60], [71] – [74], [128], [129].



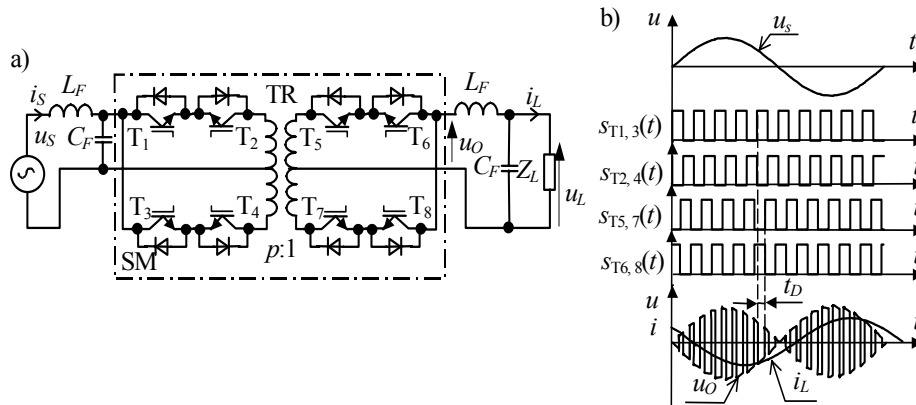
Rys. 2.28. Układ trójfazowy (stabilizator napięcia przemiennego) z SM dwubiegunowym izolowanym z regeneracyjnym układem ochrony przepięciowej, a) schemat ideowy, b) charakterystyczne przebiegi czasowe; t_δ - "czas martwy" (rys. 1.2b)



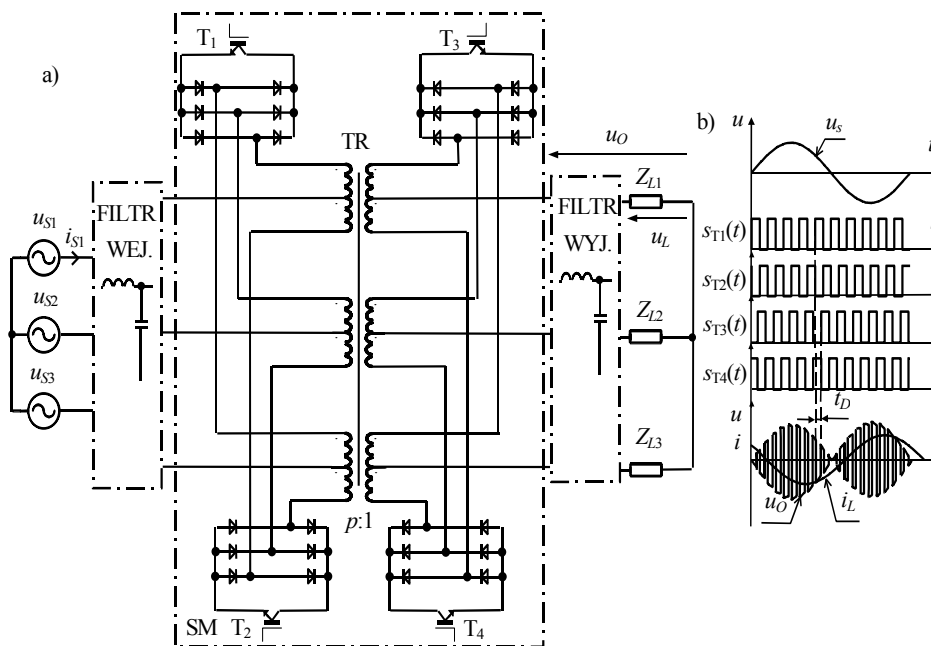
Rys. 2.29. Układy jednofazowe z SM dwubiegunowymi izolowanymi o sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym, a) z 4 + 4 łącznikami, b) z 2 + 2 łącznikami



Rys. 2.30. Przebiegi czasowe napięć i prądów w jednofazowym układzie z SM dwubiegunowym izolowanym o sterowaniu PWM z przesunięciem fazowym (rys. 2.29a) dla $\alpha = 0,8$ oraz przekładni napięciowej transformatora $p = 1$



Rys. 2.31. Układ z SM dwubiegunowym izolowanym z 2 + 2 łącznikami o sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym (z ang. "intelligent transformer", [60]), a) schemat ideowy, b) charakterystyczne przebiegi czasowe; t_D – czas opóźnienia (rys. 1.3)



Rys. 2.32. Układ z SM dwubiegunowym izolowanym z 2 + 2 łącznikami o sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym, a) schemat ideowy, b) charakterystyczne przebiegi czasowe; t_D – czas opóźnienia (rys. 1.3)