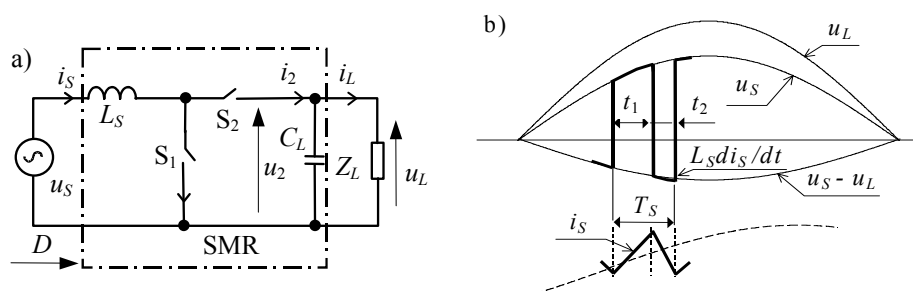


2.3. Układy matrycowo-reaktancyjne

2.3.1. Sterowniki matrycowo-reaktancyjne jednobiegunowe

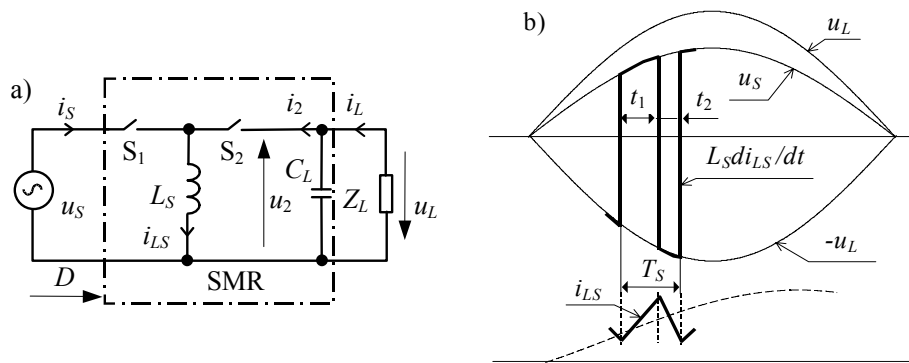
Jak już o tym wspomiano (w podrozdziałach 1.2 oraz 2.1), topologie sterowników SMR bazują na topologiach przekształtników DC/DC. Zestawienie topologii SMR jednofazowych jest zamieszczone w dodatku A. SMR, podobnie jak SM, dzielą się na jedno- i dwubiegunowe (rys. 2.3). Schematy zastępcze jednofazowych impulsowych układów transformujących napięcie przemiennie z SMR jednobiegunowymi o topologiach podstawowych pokazano na rysunkach 2.33 – 2.35, rys. 2.37 oraz rys. 2.39. Są w nich wykorzystane modele obwodowe sterowników z łącznikami idealnymi (podrozdz. 1.4, p.1)). Idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów w tych układach ilustrujące ich działanie pokazano na rysunkach odpowiednio rys. 2.33b, rys. 2.34b, rys. 2.36, rys. 2.38 oraz rys. 2.40. Idealizacja przebiegów czasowych wykorzystuje założenie, że wartości pojemności C oraz C_L są wystarczająco duże, aby pominąć odkształcenia napięć u_C oraz u_L .



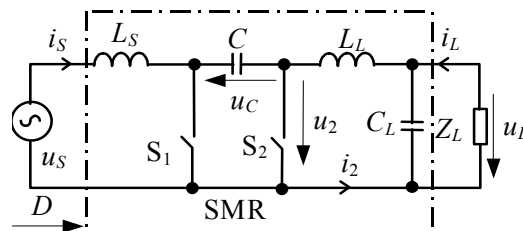
Rys. 2.33. Układ z SMR o topologii typu boost, a) schemat zastępczy z modelem obwodowym z łącznikami idealnymi, b) idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądu dławika

Na rys. 2.41 pokazano przykłady przebiegów czasowych napięć i prądów w układzie z SMR jednobiegunowym o topologii typu buck-boost, które pełniej ilustrują działanie tego układu w warunkach dopasowania rezystancji charakterystycznej SMR i obciążenia ($\sqrt{L_S/C_L} \approx R_L$, dodatek F). Schematy zastępcze dla dwóch stanów pracy omawianego układu pokazano na rys. 2.42. W czasie t_1 (u_S jest ujemne) łącznik S_1 jest włączony, a łącznik S_2 jest wyłączony (rys. 2.42a). Wartość bezwzględna prądu $i_{L_S} = i_S$ zwiększa się, prąd i_2 nie płynie, a kondensator C_L jest rozładowywany prądem i_L . Występuje gromadzenie energii w indukcyjności L_S i oddawanie energii z kondensatora C_L do obciążenia. Wartość bezwzględna napięcia obciążenia u_L zmniejsza się. W czasie t_2 (u_S jest w

dalszym ciągu ujemne) łącznik S_1 jest wyłączony, a łącznik S_2 jest włączony (rys. 2.42b). Prąd i_S nie płynie, wartość bezwzględna prądu i_{LS} zmniejsza się, a kondensator C_L jest ładowany prądem $(i_2 - i_L)$. Występuje przekazywanie energii z indukcyjności L_S , zgromadzonej w niej w czasie t_1 , do kondensatora C_L . W tym czasie wartość bezwzględna napięcia obciążenia u_L zwiększa się. Działanie omawianych sterowników jest podobne do działania odpowiednich przekształtników DC/DC i jest przedstawione w pracach [17], [18], [21], [22], [27], [29], [31] – [35], [37], [44], [63], [70], [88], [102], [131], [161].

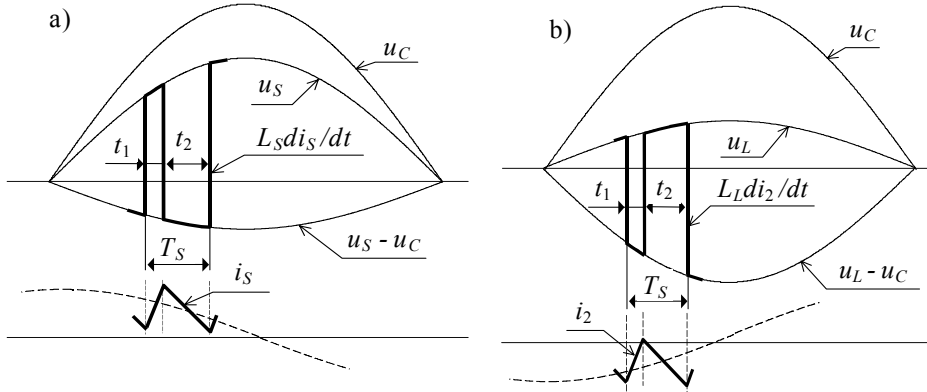


Rys. 2.34. Układ z SMR o topologii typu buck-boost, a) schemat zastępczy z modelem obwodowym z łącznikami idealnymi, b) idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądu dławika

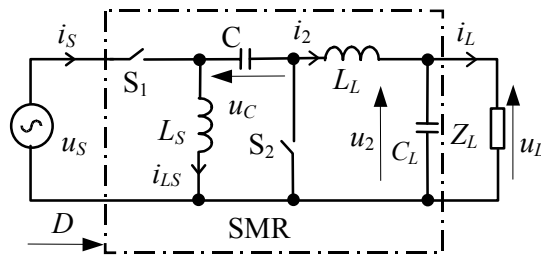


Rys. 2.35. Schemat zastępczy układu z SMR o topologii typu Ćuk

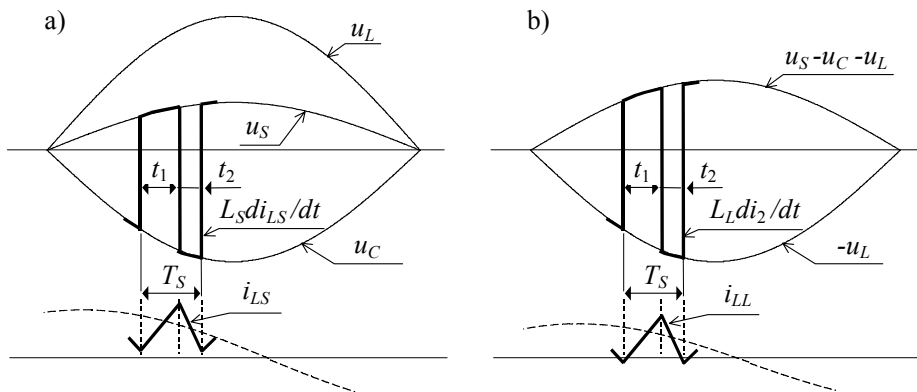
Przykłady realizacji układów SMR jednobiegunowych o topologiach typu buck-boost i Ćuk oraz oscylogramów napięć i prądów w drugim układzie pokazano odpowiednio na rysunkach rys. 2.43, rys. 2.44 oraz rys. 2.45 [17], [29], [31], [33] – [35], [70]. Oscylogramy ilustrują działanie układu w warunkach niedopasowania obciążenia ($R_L \rightarrow \infty$, $R_L \rightarrow 0$). Wówczas układ transformujący napięcie przemiennie z SMR o topologii typu Ćuk może być wykorzystywany jako gałąź o sterowanej reaktancji [17] (rys. 5.12).



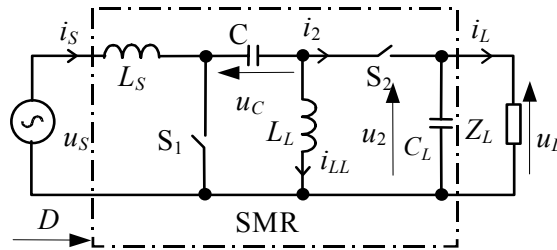
Rys. 2.36. Idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie z SMR o topologii typu Ćuk, a) dla dławika L_S , b) dla dławika L_L



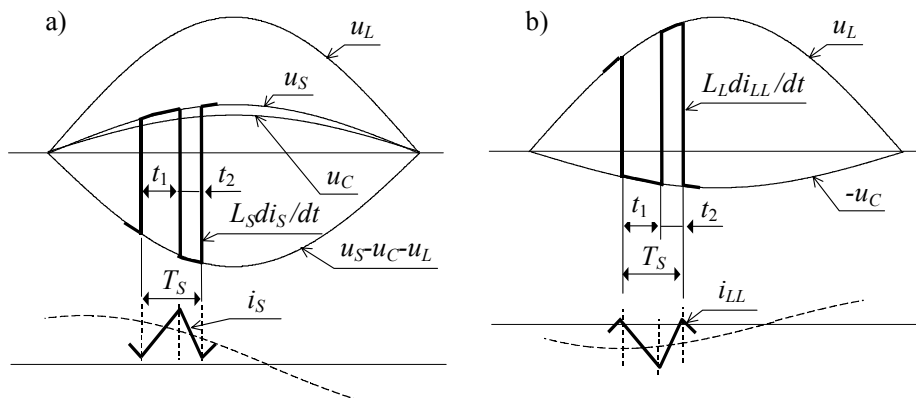
Rys. 2.37. Schemat zastępczy układu z SMR o topologii typu Zeta



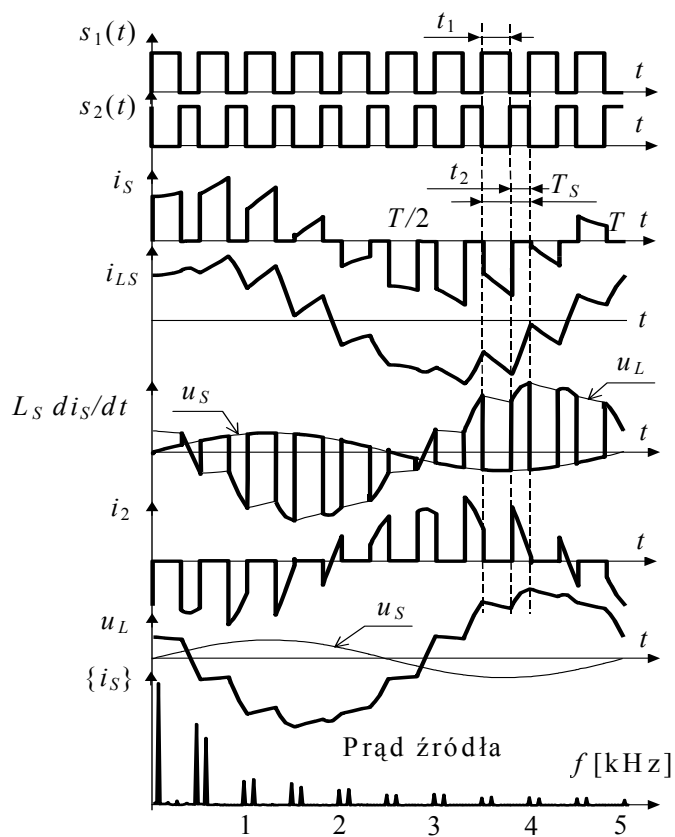
Rys. 2.38. Idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie z SMR o topologii typu Zeta, a) dla dławika L_S , b) dla dławika L_L



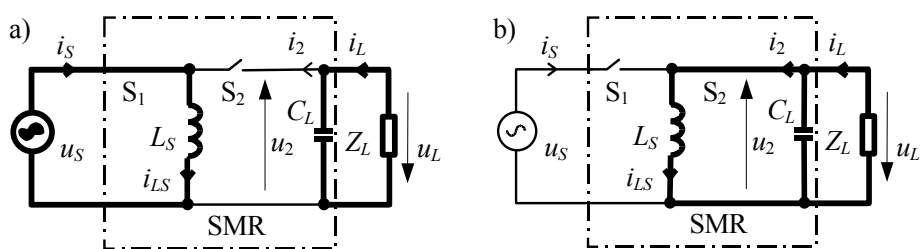
Rys. 2.39. Schemat zastępczy układu z SMR o topologii typu Sepic

Rys. 2.40. Idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie z SMR o topologii typu Sepic, a) dla dławika L_S , b) dla dławika L_L

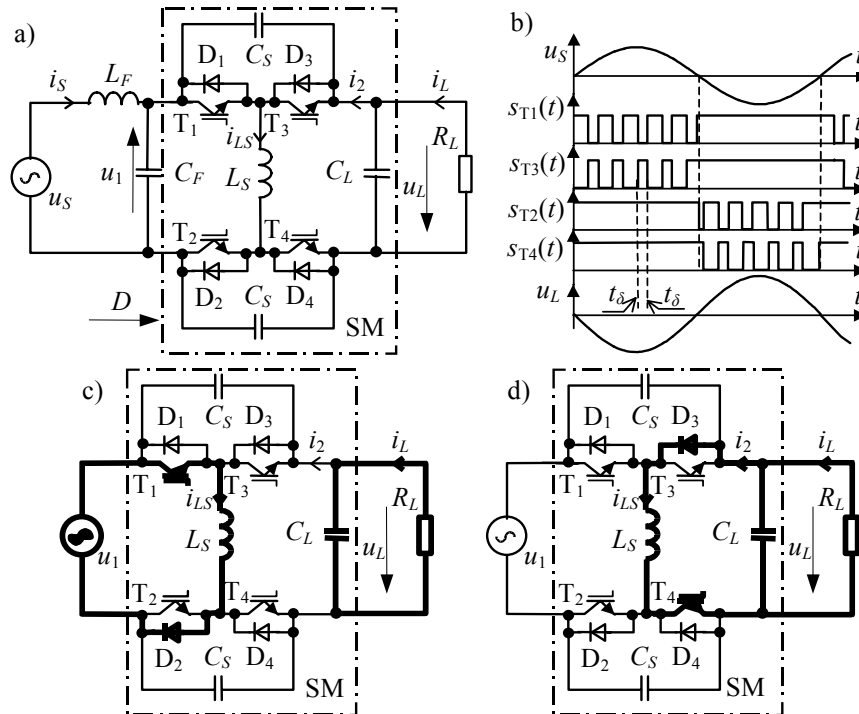
W omawianych przykładach realizacji układowych (rysunki 2.43 oraz 2.44) są stosowane łączniki typu tranzystor-dioda (jednokierunkowe) (rys. 2.43) lub dwa tranzystory-dwie diody (dwukierunkowe) (rys. 2.44). Ponadto jest stosowane sterowanie typu PWM z "czasem martwym" (rys. 1.2b). W układzie z SMR o topologii typu buck-boost (rys.2.43) występuje nieciągły prąd źródła, dlatego jest w nim stosowany dodatkowo filtr pasywny LC . Podobne rozwiązanie jest wymagane w realizacji układowej z SMR o topologii typu Zeta. Stosowanie sterowania typu PWM z "czasem martwym" wymaga wykorzystania w omawianych układach dodatkowych elementów do ochrony przed przepięciami komutacyjnymi. Są to zwykle rozwiązania ochrony przepięciowej lokalnej, klasyczne (C_S , R_S , rys. 2.44) lub regeneracyjne (C_S , rys. 2.43), które omawiano wcześniej (rys. 2.8).



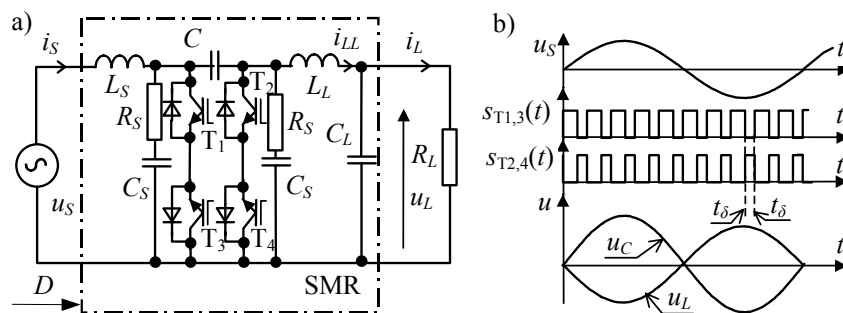
Rys. 2.41. Przebiegi czasowe napięć i prądów oraz widmo prądu źródła w układzie z SMR o topologii typu buck-boost dla $f_s = 500$ Hz oraz $D = 0,6$



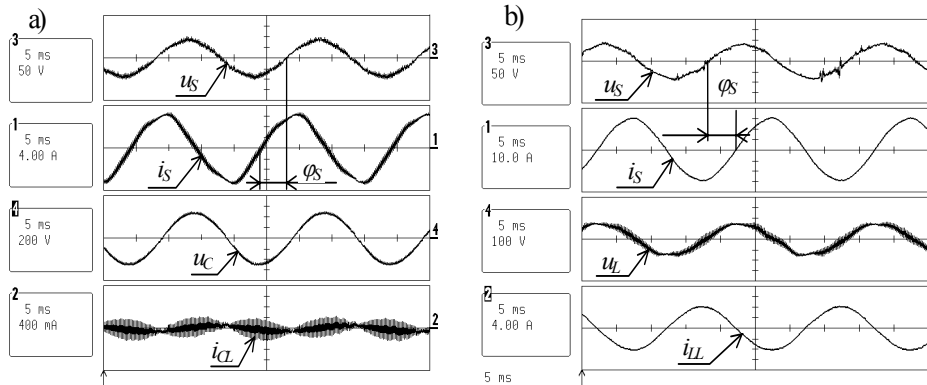
Rys. 2.42. Schematy zastępcze układu z SMR o topologii typu buck-boost, a) w czasie t_1 (rys. 2.41, S_1 włączony, S_2 wyłączony), b) w czasie t_2 (rys. 2.41, S_1 wyłączony, S_2 włączony)



Rys. 2.43. Układ z SMR o topologii typu buck-boost, a) schemat ideowy, b) przykładowe przebiegi czasowe, c) schemat zastępczy w stanie gromadzenia energii w indukcyjności L_S , d) schemat zastępczy w stanie oddawania energii z indukcyjności L_S ; t_δ - "czas martwy"

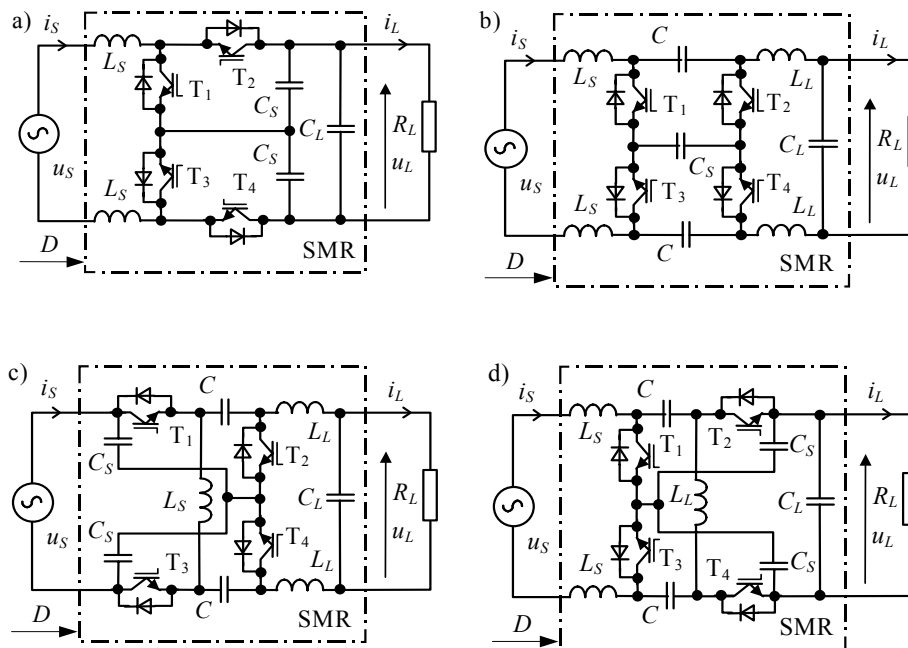


Rys. 2.44. Układ z SMR o topologii typu Ćuk, a) schemat ideowy, b) przykładowe przebiegi czasowe; t_δ - "czas martwy"



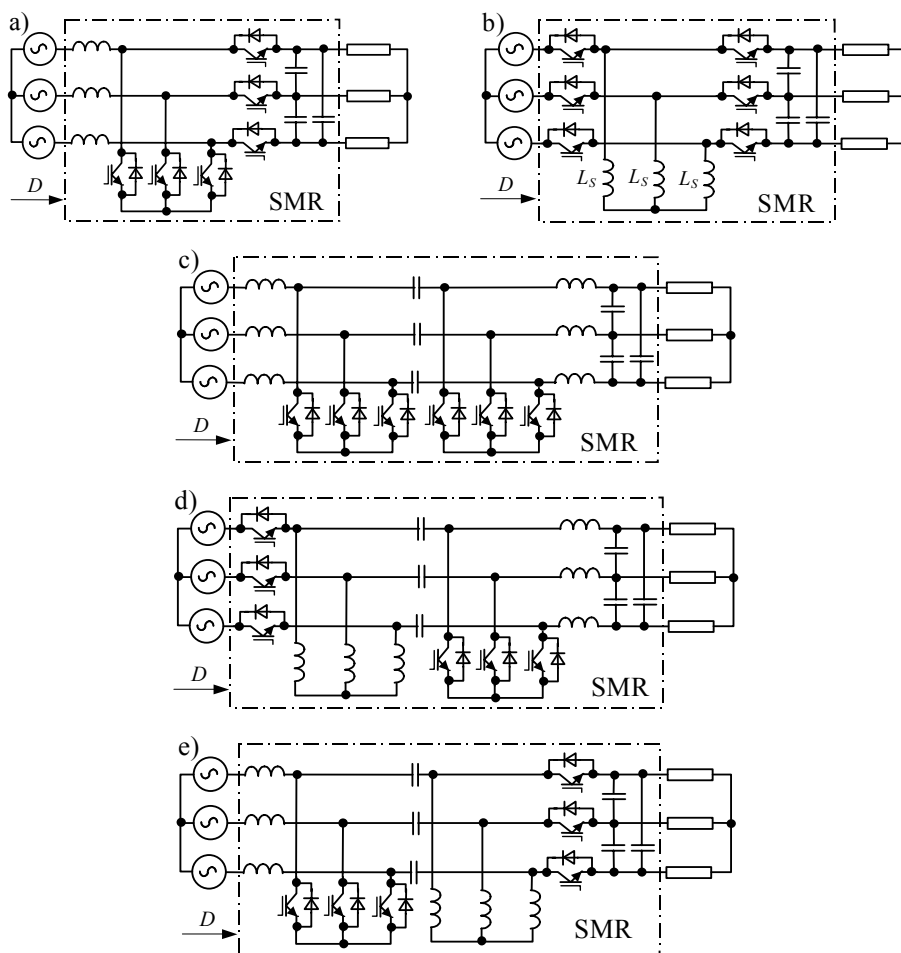
Rys. 2.45. Oscylogramy napięć i prądów w układzie pokazanym na rys.2.44 [17] w warunkach niedopasowania obciążenia dla $D = 0,8$, a) dla $R_L \rightarrow \infty$, b) dla $R_L \rightarrow 0$

Propozycje realizacji układowych pozostałych SMR jednofazowych o topologiach podstawowych (w tym inna koncepcja topologii typu Ćuk) pokazano na rys. 2.46 [32], [38], [39], [41].

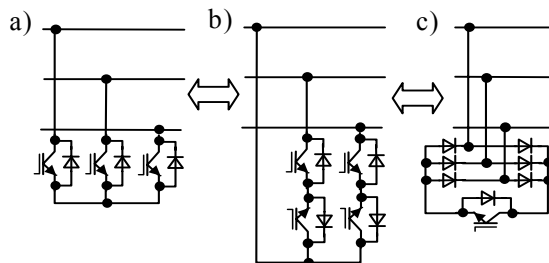


Rys. 2.46. Propozycje realizacji jednofazowych układów z SMR o topologiach podstawowych, a), b), c), d) odpowiednio typu boost, Ćuk, Zeta oraz Sepic

Rozwinięciem koncepcji topologii SMR jednofazowych jest odpowiednie ich połączenie dające trójfazowe topologie SMR. Na rys. 2.47 pokazano propozycje uproszczonych realizacji układowych takich topologii symetrycznych [29], [31] – [36], [40], [116], [131], [161]. Należy podkreślić, że w układach trójfazowych z symetrycznymi SMR mogą być stosowane łączniki typu tranzystor-dioda (jednokierunkowe). Jest to korzystna właściwość tych układów. Wymagają one tylko dwóch tranzystorów na jedną fazę, a nie czterech jak w układach jednofazowych (rysunki rys. 2.43, rys. 2.44 oraz rys. 2.46). W omawianych topologiach może być stosowana modyfikacja zestawu łączników łączących węzły fazowe w węzeł wspólny, która jest pokazana na rys. 2.48.

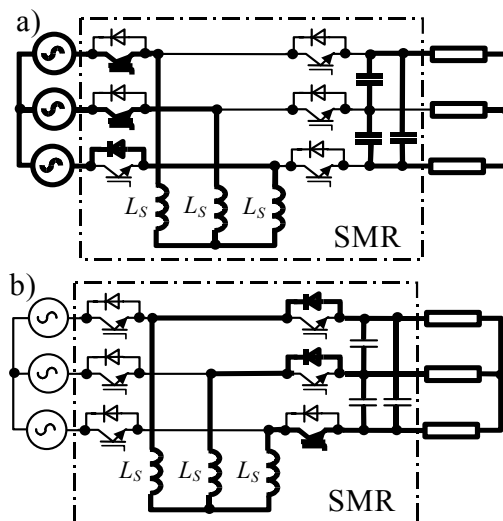


Rys. 2.47. Uproszczone układy trójfazowe z symetrycznymi SMR jednobiegunowymi o topologiach podstawowych typu: a) boost, b) buck-boost, c) Ćuk, d) Zeta, e) Sepic



Rys. 2.48. Topologie łączników łączących węzły fazowe w węzeł wspólny, a) typu tranzystor-dioda, b) typu dwa tranzystory-dwie diody, c) typu tranzystor-trójfazowy mostek diodowy

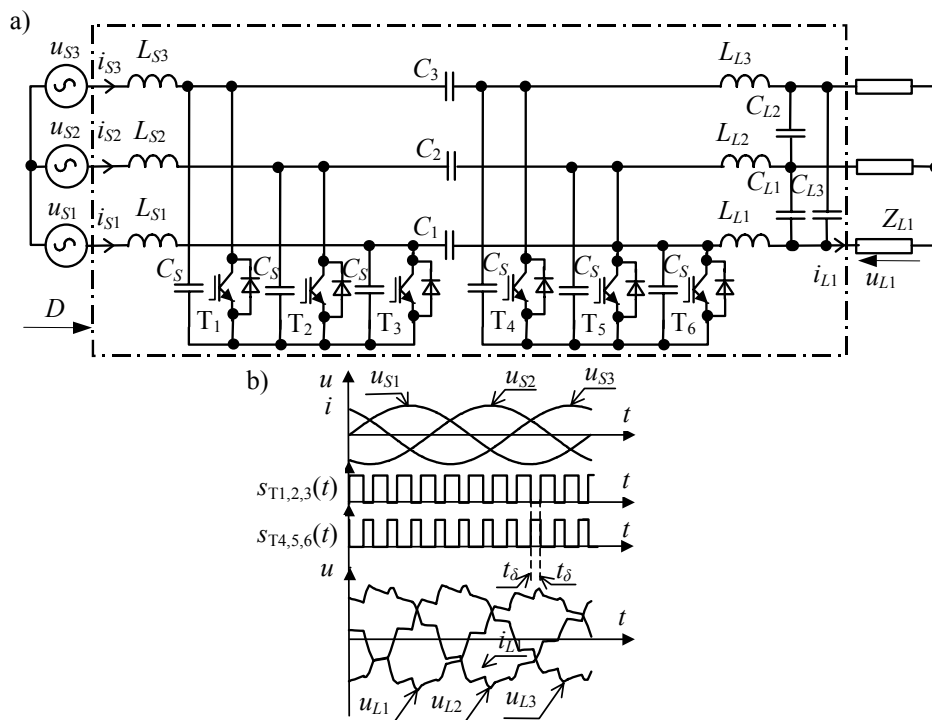
Działanie trójfazowych układów z SMR symetrycznymi jest podobne do działania układów jednofazowych. Częściowe potwierdzenie wynika z porównania schematów zastępczych układów z jednofazowym i trójfazowym SMR o topologii typu buck-boost, które są pokazane na rysunkach rys. 2.43c, d oraz rys. 2.49. Przykład realizacji układowej trójfazowego SMR symetrycznego o topologii typu Ćuk pokazano na rys. 2.50 [31], [33] – [35].



Rys. 2.49. Schematy zastępcze trójfazowego układu z SMR symetrycznym o topologii typu buck-boost (rys.2.47b), a) w stanie gromadzenia energii w indukcyjnościach L_S , b) w stanie oddawania energii z indukcyjności L_S

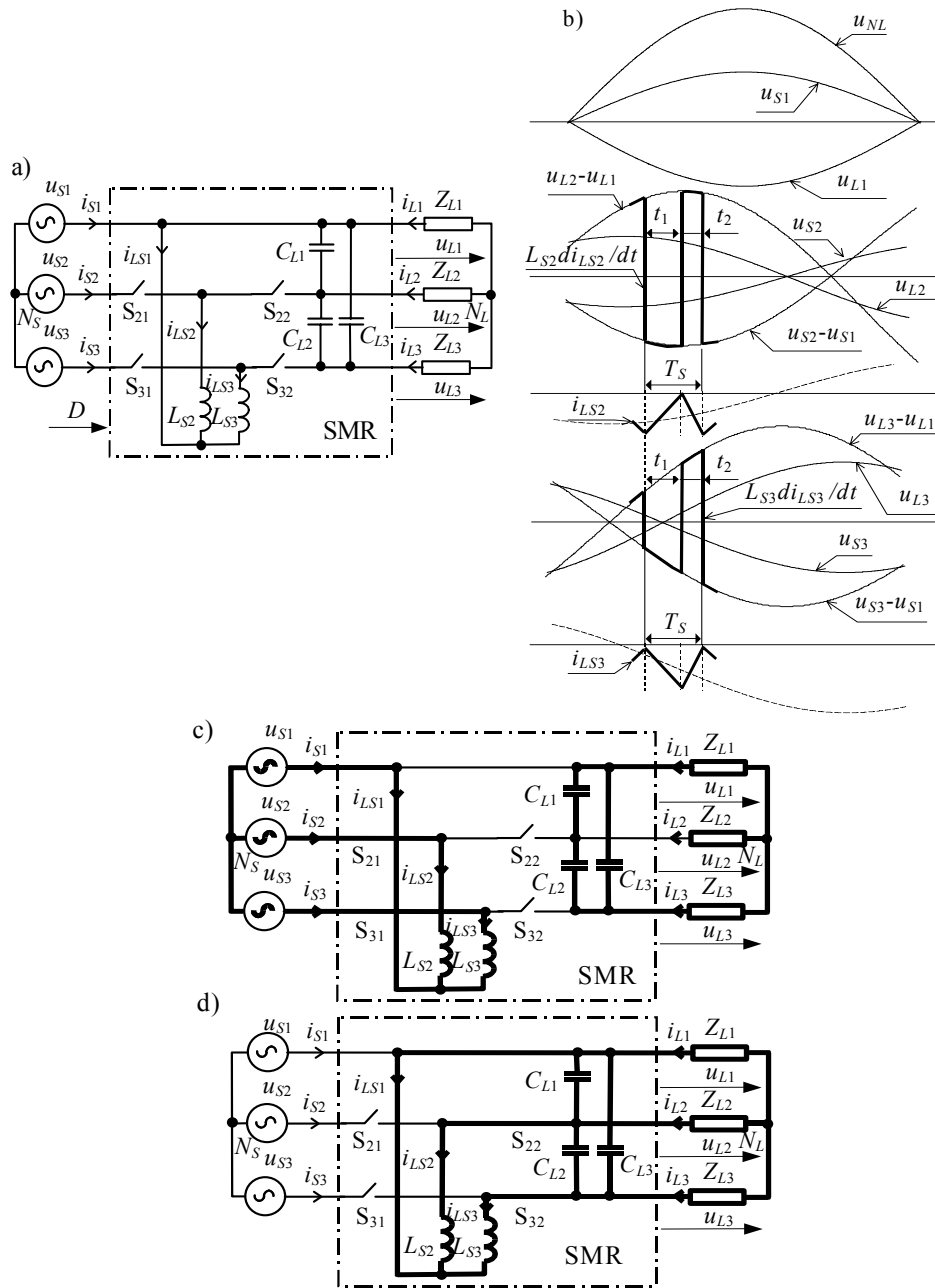
Dalszym rozwinięciem koncepcji topologii trójfazowych są topologie trójfazowe niesymetryczne. Schemat zastępczy układu z SMR niesymetrycznym o topologii typu buck-boost oraz rysunki ilustrujące działanie tego układu pokazano na rys. 2.51. W schematach zastępczych tego układu są wykorzystane

modele obwodowe SMR z łącznikami idealnymi. Z rys.2.51 widać, że w układzie z SM niesymetrycznym jedna faza źródła zasilającego jest połączona bezpośrednio z obciążeniem, co pozwala na redukcję ilości łączników stosowanych w tym układzie. Jest jednak konieczne stosowanie łączników typu dwa tranzystory-dwie diody lub tranzystor-trójfazowy mostek diodowy (łączniki dwukierunkowe).

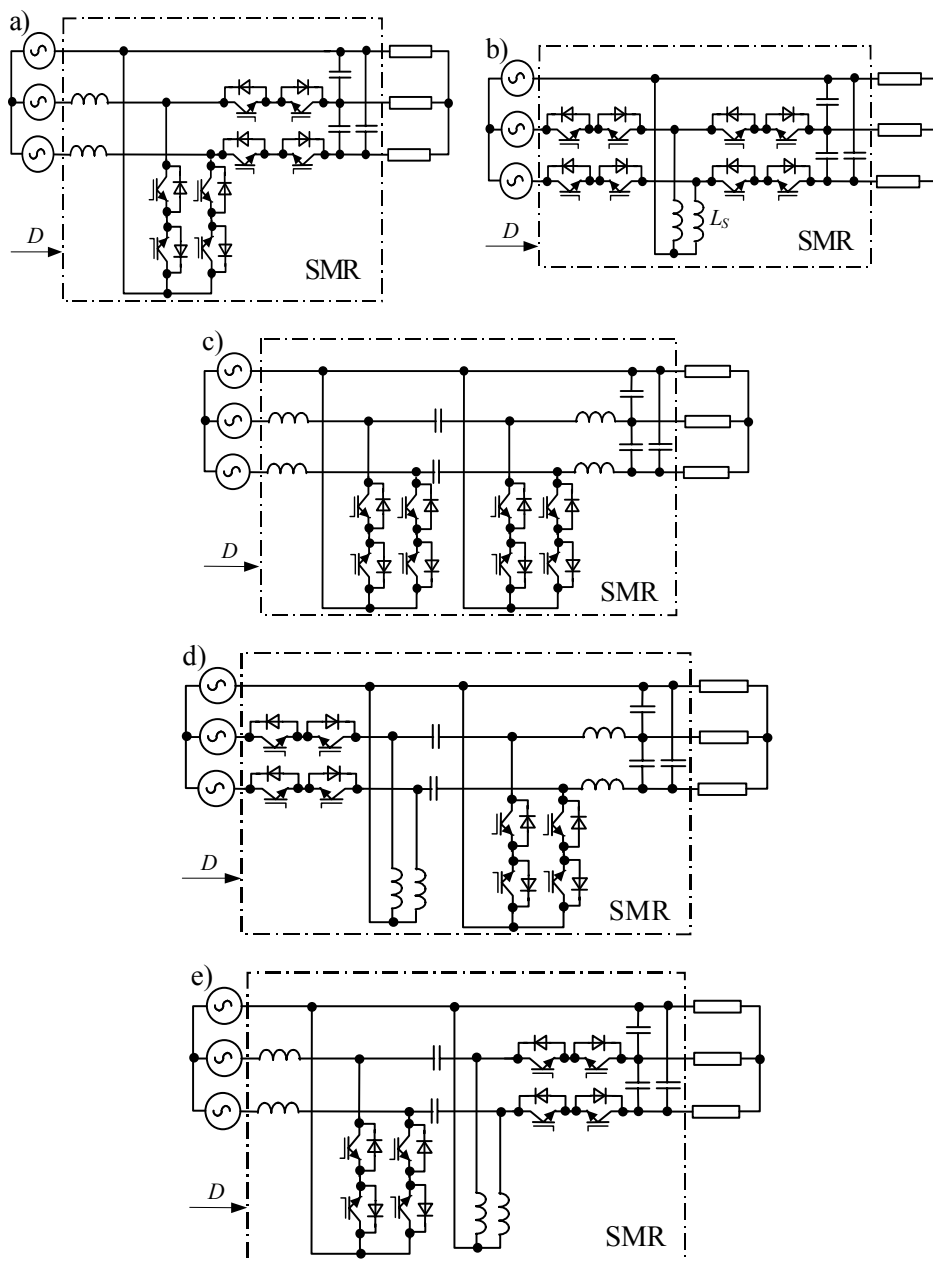


Rys. 2.50. Układ z SMR symetrycznym jednobiegunowym o topologii typu Ćuk, a) schemat ideowy, b) charakterystyczne przebiegi czasowe

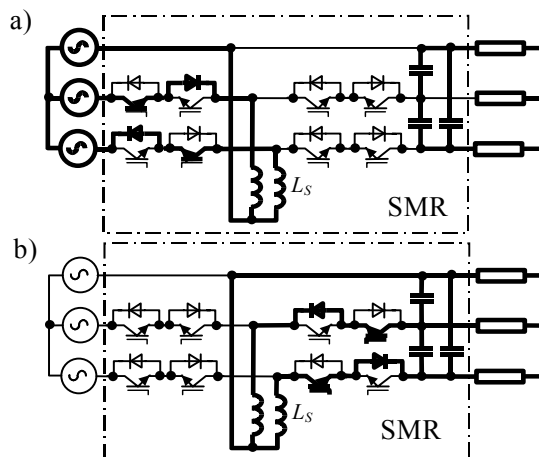
Przykłady uproszczonych realizacji układów z SMR niesymetrycznymi o innych topologiach podstawowych pokazano na rys.2.52 [36], [40]. Schematy zastępcze ilustrujące działanie układu o topologii typu buck-boost (rys. 2.52b) pokazano na rys. 2.53. Korzystną właściwością układów z SMR niesymetrycznymi jest mniejsza liczba tranzystorów. Są to 4 tranzystory lub 3 tranzystory, zależnie od typu łącznika do połączeń zacisków fazowych w węzeł wspólny (rys. 2.48). W układach z topologiami symetrycznymi jest to 6 tranzystorów lub są to 4 tranzystory.



Rys. 2.51. Układ trójfazowy z niesymetrycznym SMR o topologii typu buck-boost, a) schemat zastępczy, b) idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów dławików, c) schemat zastępczy w stanie gromadzenia energii w indukcyjnościach L_S , d) schemat zastępczy w stanie oddawania energii z indukcyjności L_S



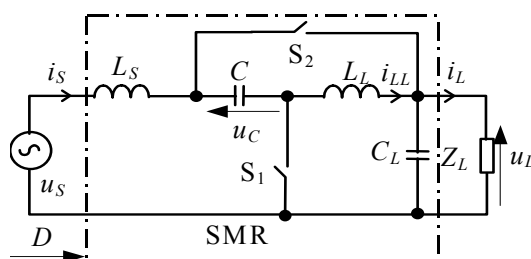
Rys. 2.52. Uproszczone układy trójfazowe z niesymetrycznymi SMR jednobiegunowymi o topologiach podstawowych typu: a) boost, b) buck-boost, c) Ćuk, d) Zeta, e) Sepic



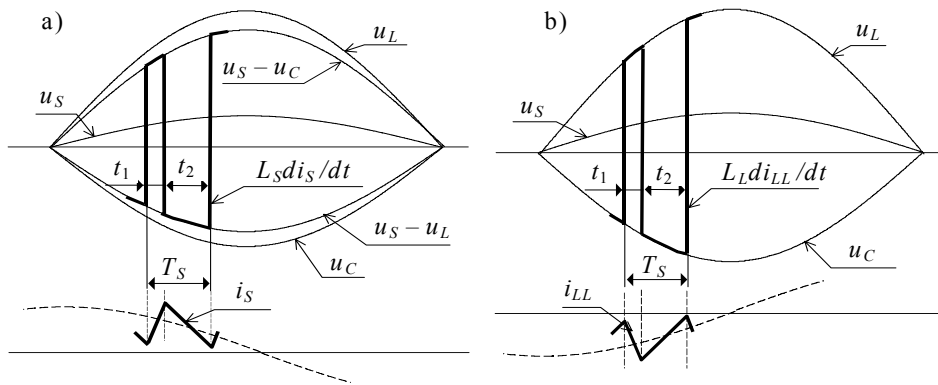
Rys. 2.53. Schematy zastępcze trójfazowego układu z SMR symetrycznym o topologii typu buck-boost (rys. 2.52b), a) w stanie gromadzenia energii w indukcyjnościach L_S , b) w stanie oddawania energii z indukcyjności L_S

2.3.2. Sterowniki matrycowo-reaktancyjne dwubiegunowe

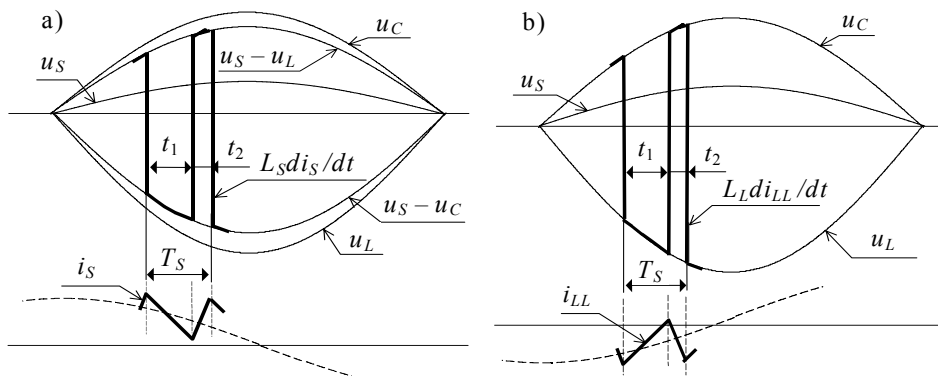
Koncepcja adaptacji topologii przekształtników DC/DC obejmuje również topologie przekształtników dwubiegunowych (dodatek A oraz rys. 2.3). Schematy zastępcze jednofazowych impulsowych układów transformujących napięcie przemiennie z SMR dwubiegunowymi o topologiach podstawowych pokazano na rysunkach 2.54 oraz 2.57. Są w nich wykorzystane modele obwodowe sterowników z łącznikami idealnymi (podrozdz. 1.4, p.1)). Idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów ilustrujące działanie tych układów pokazano odpowiednio na rysunkach rys. 2.55 i rys. 2.56 (dla topologii typu Ćuk B1) oraz rys. 2.58 i rys. 2.59 (dla topologii typu Ćuk B2) [21], [22], [42], [64], [67], [68]. Idealizacja przebiegów wykorzystuje założenie, o którym wspomniano wcześniej przy omawianiu SMR jednobiegunowych (podrozdz. 2.3.1).



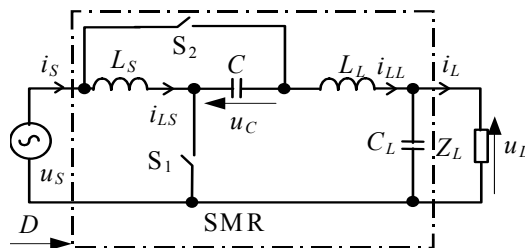
Rys. 2.54. Schemat zastępczy układu z SMR o topologii typu Ćuk B1



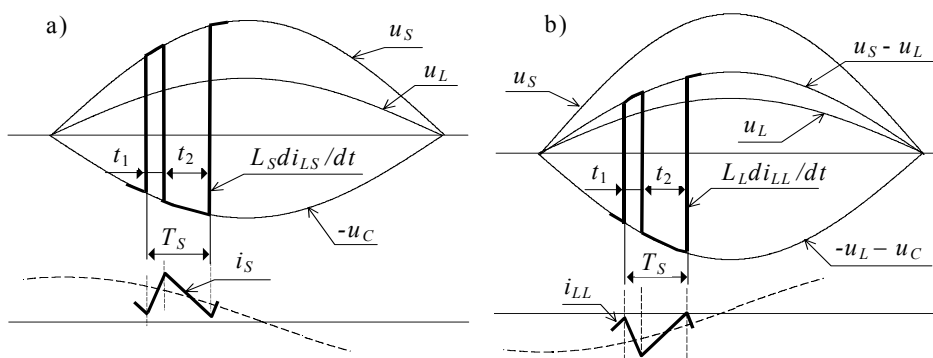
Rys. 2.55. Idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie z SMR o topologii typu Ćuk B1 dla $D < 0.5$, a) dla dławika L_S , b) dla dławika L_L



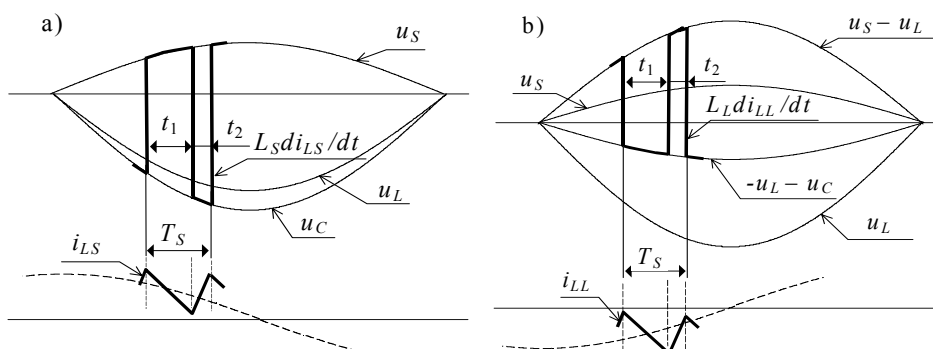
Rys. 2.56. Idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie z SMR o topologii typu Ćuk B1 dla $D > 0.5$, a) dla dławika L_S , b) dla dławika L_L



Rys. 2.57. Schemat zastępczy układu z SMR o topologii typu Ćuk B2



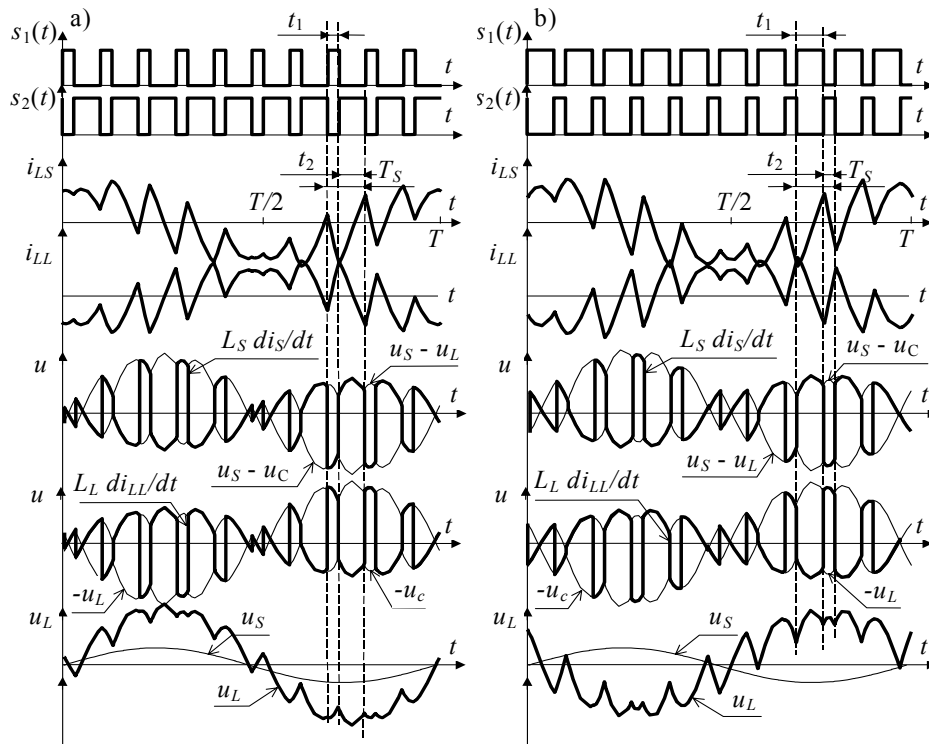
Rys. 2.58. Idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie z SMR o topologii typu Ćuk B2 dla $D < 0.5$, a) dla dławika L_S , b) dla dławika L_L



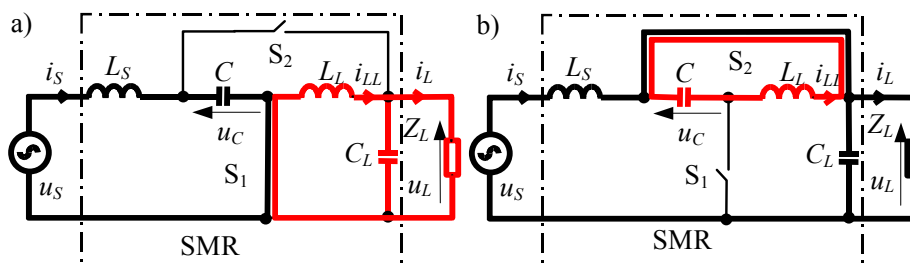
Rys. 2.59. Idealizowane przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie z SMR o topologii typu Ćuk B2 dla $D < 0.5$, a) dla dławika L_S , a) dla dławika L_L

Na rys.2.60 pokazano przykłady przebiegów czasowych napięć i prądów w układzie z SMR dwubiegunowym o topologii typu Ćuk B1, które szerzej ilustrują działanie tego układu w warunkach dopasowania rezystancji charakterystycznej układu i obciążenia ($\sqrt{L_S/C} = \sqrt{L_L/C_L} \approx R_L$, dodatek F). Schematy zastępcze odpowiadające stanom pracy omawianego układu w analizowanym przedziale czasu pokazano na rys.2.61. Dla $D < 0,5$ (rys. 2.60a), w czasie t_1 (u_S jest ujemne) łącznik S_1 jest włączony, a łącznik S_2 jest wyłączony. Przez łącznik S_1 płyną prądy i_{LS} oraz i_{LL} . W tym czasie występuje wymiana energii pomiędzy elementami trzech podobwodów pokazanych na rys. 2.61a. W czasie t_2 , prądy i_{LS} oraz i_{LL} płyną przez włączony łącznik S_2 . Występuje wówczas wymiana energii pomiędzy elementami trzech podobwodów pokazanych na rys. 2.61b. W efekcie uzyskujemy przemienne napięcie obciążenia u_L

o wartościach większych od napięcia zasilania (zakładając brak odkształceń), zależnych od współczynnika wypełnienia impulsu D . W tym przedziale zmian D napięcie wyjściowe jest w fazie z napięciem zasilającym (rys. 2.60a).



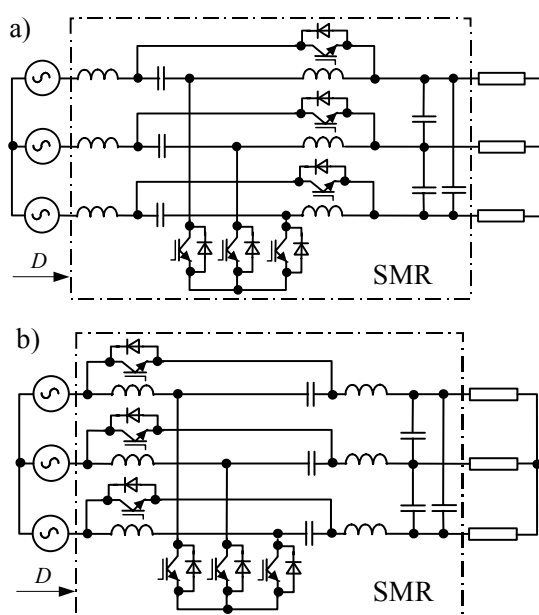
Rys. 2.60. Przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie z SMR dwubiegunowym o topologii typu Ćuk B1 (rys. 2.54) dla $f_s = 500$ Hz, a) dla $D = 0,3$, b) dla $D = 0,7$



Rys. 2.61. Schematy zastępcze układu z SMR o topologii typu Ćuk B1, a) w czasie t_1 (rys. 2.60a, S_1 włączony, S_2 wyłączony), b) w czasie t_2 (rys. 2.60a, S_1 wyłączony, S_2 włączony)

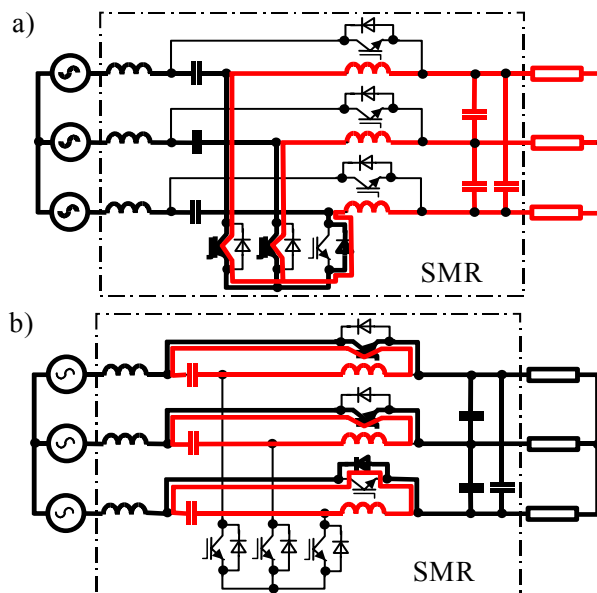
Działanie układu z SMR dwubiegunowym o topologii typu Ćuk B1 dla $D > 0,5$ jest podobne do działania omówionego wcześniej dla $D < 0,5$ (rysunki rys. 2.60, rys. 2.61). W tym przedziale zmian D uzyskujemy przemienne napięcie wyjściowe, które jest w przeciwfazie do napięcia zasilającego (rys. 2.60b).

Rozwinięciem topologii jednofazowych SMR dwubiegunowych są symetryczne i niesymetryczne topologie trójfazowe. Propozycje uproszczonych realizacji układów SMR dwubiegunowych symetrycznych pokazano na rys. 2.62 [32], [36], [40]. Schematy zastępcze ilustrujące działanie tego układu pokazano na rys. 2.63.

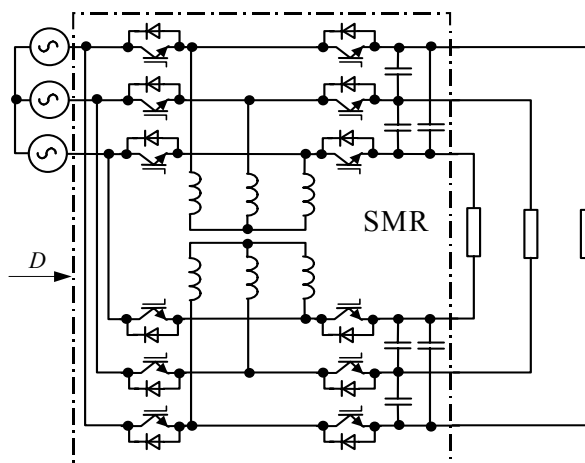


Rys. 2.62. Uproszczone układy trójfazowe z symetrycznymi SMR dwubiegunowymi o topologiach, a) typu Ćuk B1, b) typu Ćuk B2

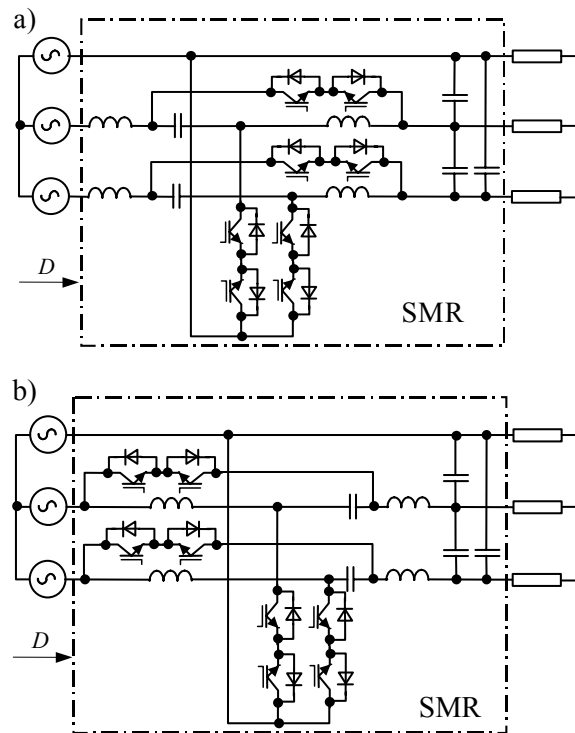
Na kolejnych rysunkach rys. 2.64 oraz rys. 2.65 pokazano uproszczoną propozycję innej realizacji trójfazowego układu dwubiegunowego symetrycznego oraz propozycję realizacji trójfazowych układów z SMR dwubiegunowymi niesymetrycznymi.



Rys. 2.63. Schematy zastępcze układu z SMR dwubiegunowym o topologii typu \acute{C} uk B1 w stanach pracy przy włączonych łącznikach a) źródła, b) obciążenia



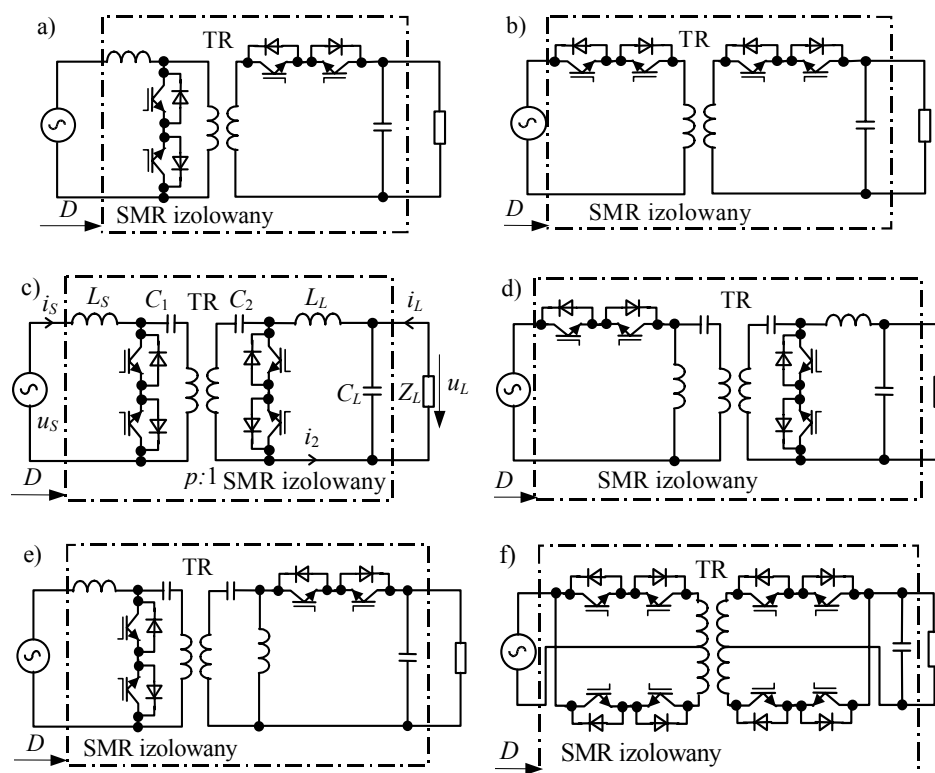
Rys. 2.64. Uproszczony układ trójfazowy z SMR symetrycznym dwubiegunowym o topologii typu buck-boost o połączeniu szeregowo-równoległym



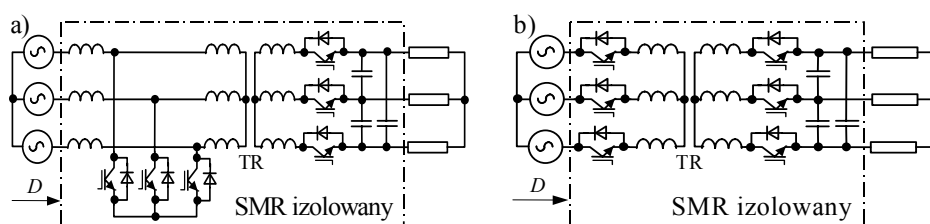
Rys. 2.65. Uproszczone układy trójfazowe z SMR niesymetrycznymi dwubiegunowymi o topologiach, a) typu Čuk B1, b) typu Čuk B2

2.3.3. Sterowniki matrycowo-reaktancyjne izolowane

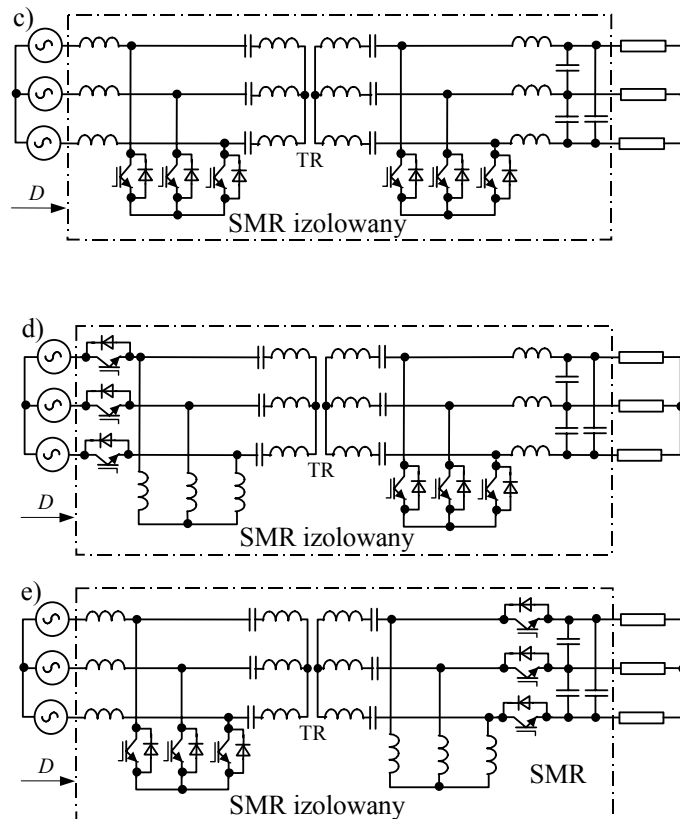
W układach transformujących napięcia przemiennie z SMR izolowanymi sterownik zawiera transformator. Propozycje uproszczonych realizacji układowych SMR izolowanych jedno- oraz trójfazowych pokazano na rysunkach 2.66 oraz 2.67 [31], [35], [37] – [40]. Jak już wspomniano w podrozdziale 1.2, te topologie dają więcej stopni swobody w zakresie sposobu włączania transformatora w układzie SMR ze względu na większą liczbę węzłów w SMR niż w SM. Dotyczy to zwłaszcza topologii SMR wyższego rzędu (np. topologie podstawowe typu Čuk, Zeta lub Sepic). Umieszczenie transformatora w strukturze SMR, oprócz izolacji galwanicznej, daje oczywiście efekt w postaci dodatkowego stopnia swobody w kształtowaniu funkcji układowych SMR oraz właściwości omawianych układów (rozdział 4).



Rys.2.66. Jednofazowe układy z SMR izolowanymi o topologiach typu: a) boost, b) buck-boost lub flyback, c) Ćuk, d) Zeta, e) Sepic, f) push-pull



Rys. 2.67. Trójfazowe układy z SMR izolowanymi o topologiach typu: a) boost, b) buck-boost



Rys. 2.67c. d. Trójfazowe układy z SMR izolowanymi o topologiach typu: c) Ćuk, d) Zeta, e) Sepic

2.4. Podsumowanie

- W impulsowych układach transformujących napięcia przemiennie są stosowane sterowniki matrycowe (SM), sterowniki matrycowo-reaktancyjne (SMR) oraz SM i SMR izolowane (rysunki 2.1 – 2.3).
- Topologie SM bazują na topologiach przekształtnika singularnego (jednofazowe, rys. 2.4) oraz przekształtnika matrycowego (trójfazowe, rysunki 2.11 – 2.17). W układach z SM jest możliwa zmiana wartości napięcia obciążenia tylko w zakresie od zera do wartości napięcia zasilającego (zmniejszanie napięcia zasilania).
- Topologie SM izolowanych o sterowaniu typu PWM są realizowane przez kaskadowe połączenie SM i transformatora (rysunki 2.24, 2.25). Wartość

częstotliwości harmonicznej podstawowej prądów oraz strumienia w rdzeniu transformatora jest taka sama jak częstotliwość napięcia zasilającego.

- Topologie SM izolowanych o sterowaniu typu PWM z przesunięciem fazowym są realizowane przez umieszczenie dwóch SM dwubiegunowych po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora (rys. 2.29). W układach z tymi sterownikami występuje wysokoczęstotliwościowe transformowanie energii elektrycznej. W rdzeniu transformatora nie występuje harmoniczna podstawowa strumienia magnetycznego o częstotliwości napięcia zasilającego.
- Topologie SMR jednofazowych bazują na adaptacji topologii przekształtników prądu stałego na prąd stały (DC/DC) (dodatek A, topologie SMR jednobiegunowych, rysunki 2.33 – 2.40, dwubiegunowych, rysunki 2.54 – 2.59). W układach z SMR jest możliwe uzyskanie napięcia obciążenia o wartości mniejszej i większej od napięcia zasilania (zmniejszanie i / lub zwiększanie napięcia zasilania).
- Topologie SMR trójfazowych są realizowane przez połączenie topologii jednofazowych (symetryczne – rysunki rys. 2.47, rys. 2.62 oraz rys. 2.64, niesymetryczne – rysunki rys. 2.51, rys. 2.52 oraz rys. 2.65. Korzystną właściwością topologii niesymetrycznych w porównaniu z topologiami symetrycznymi jest mniejsza liczba tranzystorów.
- Topologie SMR izolowanych są realizowane przez umieszczenie transformatora w SMR (rysunki 2.66 oraz 2.67). Te topologie dają więcej stopni swobody w zakresie sposobu włączania transformatora ze względu na większą liczbę węzłów w SMR niż w SM. Dotyczy to topologii SMR wyższego rzędu (np. topologie podstawowe typu Ćuk, Zeta lub Sepic).