

INFO

- dr. inż. Grzegorz Tarczala
 - wykłady dostępujane w formie PDF
 - księzka + skrypt
 - zaliczenie: test na lekcji, dwa pytania: np. "różnica między...?", "co to konwalaria?", "co to są akt. miękkie - przetwarzalne?" + 4 pytania. każda z dziedzin: falownik, przekształtnik, 50% pkt → zaliczenie
 - KSAZIKI: Tunia / Winiarzki - Energoelektronika
- Mohon → „Power Electronics”

WSTĘP

- ENERGOELEKTRONIKA - elementy elektroniczne, teoria obwodów, teoria sterowania; kierowanie tranzystorów, tranzystorów, itc. w celu konwersji, sterowania i kondycjonowania mocy elektrycznej
slajd definicja ICF
- PASYWNE PRZETWARZANIE MOCY
 - rzadko stosowane, najczęściej prostowniki niestosowane: dioda
- AKTYWNE PRZETWARZANIE MOCY
 - wejście sterujące, np. prostownik sterowany, falownik
 - na bolota: umieć opisać sposób sterowania danego tranzystora, itc.
np. "tranzystor powinien być złączony po pewnym czasie od..."
 - może pogodzić się input = feedforward; feedback (kontrola wejścia; wyjścia)
 - przekształtujesz zawierając elem. pasywne: np. diody, tranzystory, triody
- KONWERSJA
 - cztery typy: AC/DC, DC/AC, DC/DC, AC/AC wraz z symbolami

prostownik	falownik	wykonawca
przekształcający	sterujący	przyjętego
Przekształcanego		
 - FALOWNIK - układ zarządzający napięciem stałym; PRZEMIENNIK - zas. napięciem przemiennym
 - uproszczony schemat:
- na testie: jaka jest różnica między cyfrowym konwerterem a sterowaniem prądu przemiennego?
- SYSTEMY ENERGOELEKTRONICZNE

- podzielić: prostowniki, przekształtniki, falowniki, sterowniki prądu przeniesionego, cykłokonwertyery
 rectifiers choppers inverters AC/DC
 we prostowniki, przekształtniki mocy
 bif. np. silniki

- PROSTOWNIKI - zasilanie napięciem/prądem stałym

- PRZEKSZTÄLTNIKI: soft-switching - zapewniamy tylko przekształcanie przy zerze (U, I)
 hard-switching - "twardy przekształcanie" - przekształcanie, kiedy prąd płynie
 zmiana napięcia sieci: tzw.zystava: step-up \rightarrow step-down

- FALOWNIKI: np. falowniki napięcia, falowniki prądu, rezonansowe (soft-switching),
 • falowniki 9-fazowe, np. w autach (jedna faza wyjścia - jest git)
 • falowniki 2-pozycyjne - każda faza może być połączona do + / -

- STEROWNIKI PRĄDU PRZEMIENNEGO:

- np. ujawnianie kawatkami sinusoidy
- CYKŁOKONWERTERY

• ZASTOSOWANIA ENERGOELEKTRONIKI:

- NAPĘDY ELEKTRYCZNE - zasilanie silników prądu stałego: przeniesionego
- silnik prądu stałego: dwa prostowniki, jeden sterowany
- silnik indukcyjny: przeniesienie częstotliwości; odzysk energii: prostownik sterowany; np. gondola 3-lody
- URZĄDZENIA DOMOWE - urządzenia AGD, zasilane komputerowe, kucharki

• ENERGIA ODNAWIALNA

- dostosowywanie napięcia generowanego przez turbinę wiatrową do napięcia sieci,
 np. poprzez filtry, ultrad prostownik-falownik

• UKŁADY WYSOKIEGO NAPIĘCIA HVDC High Voltage Direct Current

- transmisja DC wysokiego napięcia
- tylko 2 poziomy, brak induktywności lini: 100%
- połączenie np. z Japonią (50Hz \rightarrow 60Hz)

• ELEMENTY UKŁADÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH

- następny wykład



Wykład 1

Energoelektronika

- wstęp

dr inż. Grzegorz Tarchała



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology

Energoelektronika

Definition

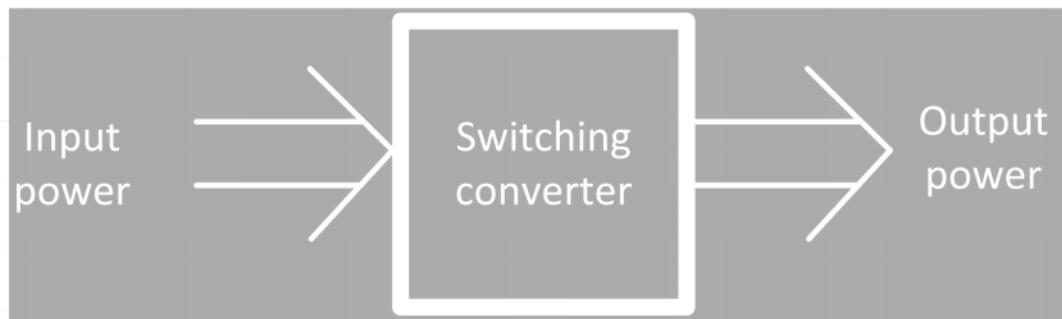
Power electronics encompasses the use of electronic components, the application of circuit theory and design techniques, and the development of analytical tools toward efficient electronic conversion, control, and conditioning of electric power

– *Definicja IEEE Power Electronics Society*

Energoelektronika

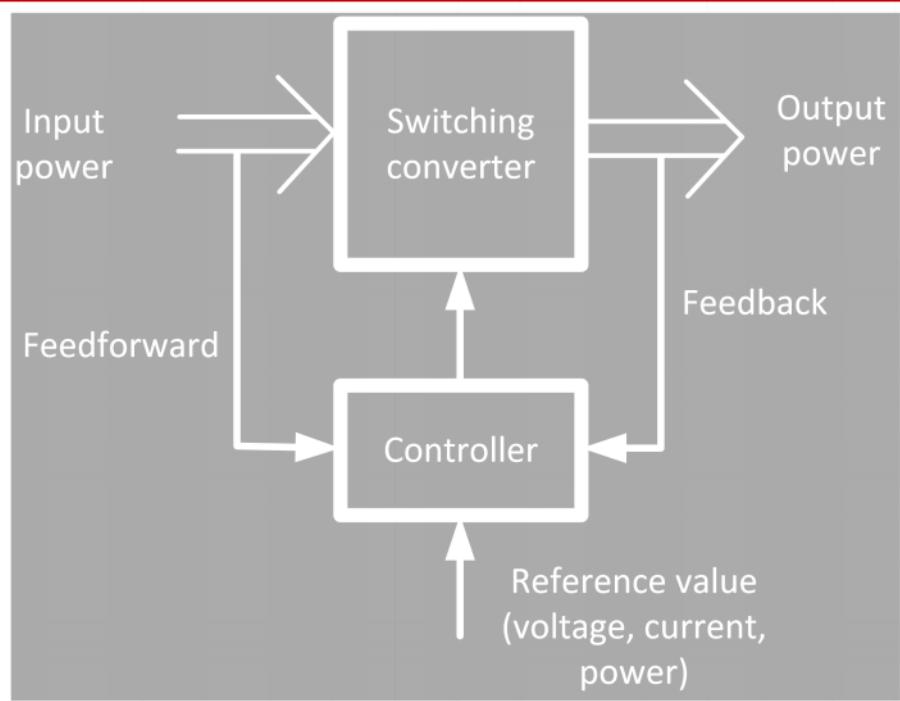
Definicja

Przetwarzanie mocy - pasywne



Energoelektronika

- Sterowanie przy wykorzystaniu mikroprocesorów
- Przekształtniki zawierają: elementy pasywne, diody, elementy przełączalne, takie jak tranzystory i tyristory

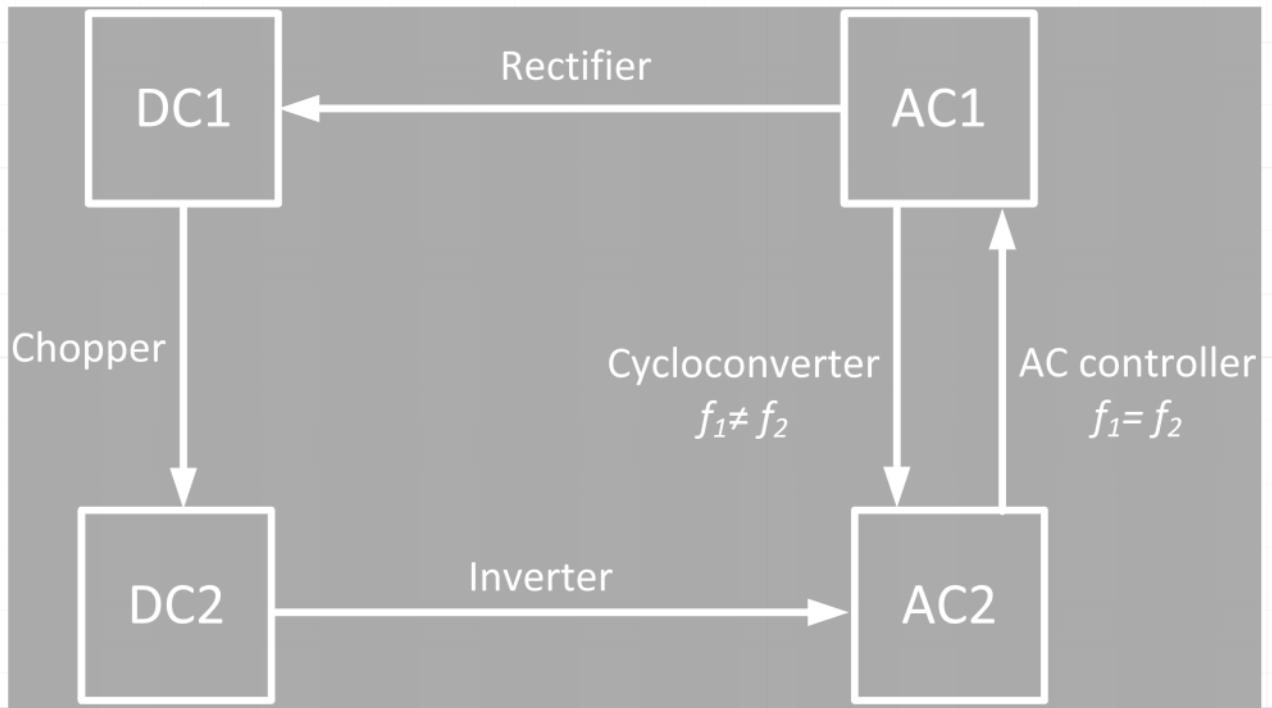


Rodzaje konwersji

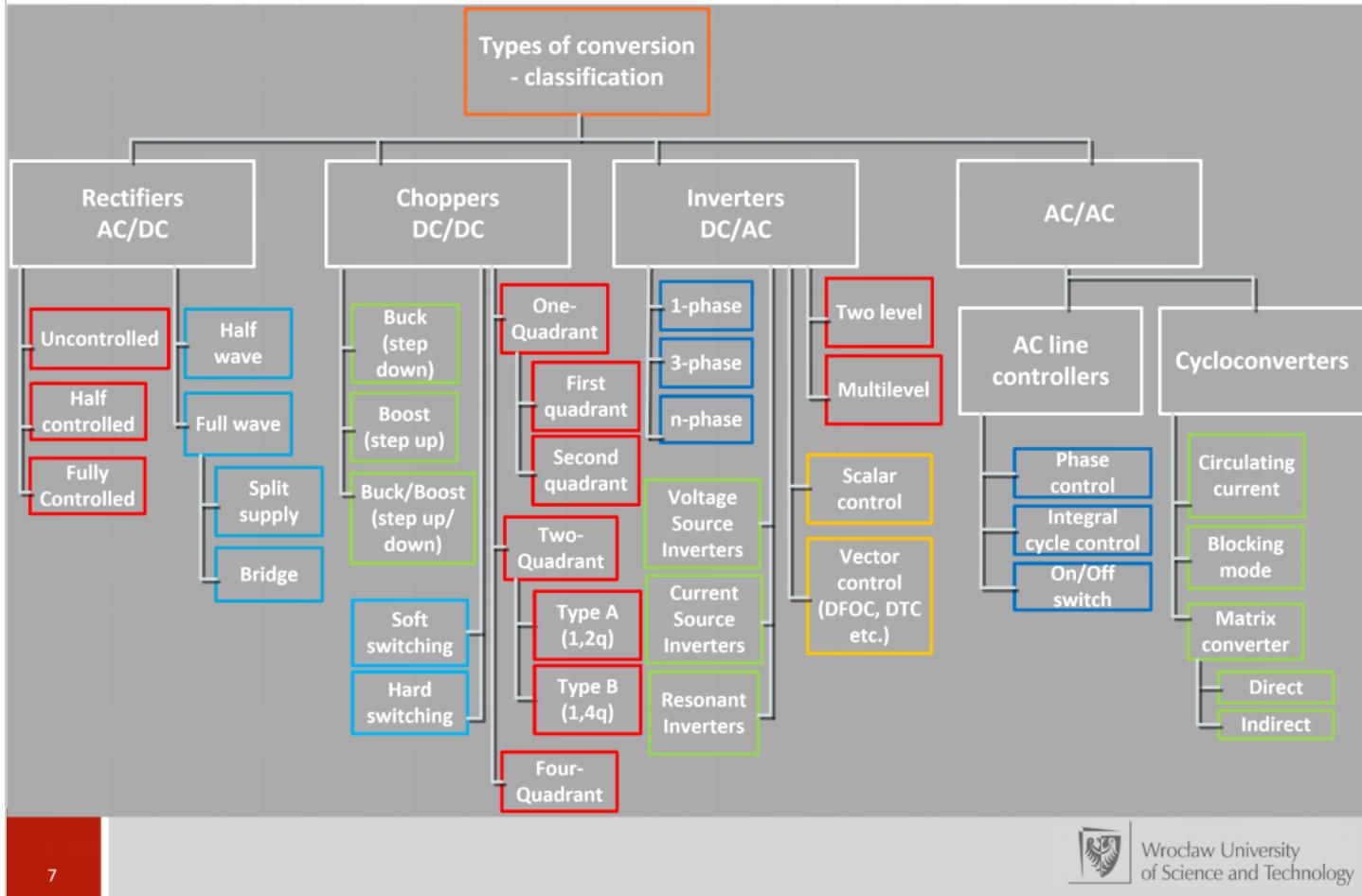
	Typ	Wejście	Wyjście	Symbol
AC/DC	Prostownik	Napięcie przemienne o stałej amplitudzie i częstotliwości	Napięcie stałe o zadanej wartości	
DC/AC	Falownik	Napięcie stałe o stałej wartości	Napięcie przemienne o zadanej amplitudzie i częstotliwości	
DC/DC	Sterownik prądu stałego	Napięcie stałe o stałej wartości	Napięcie stałe o zadanej wartości	
AC/AC	Cyklokonwertor	Napięcie przemienne o stałej amplitudzie i częstotliwości	Napięcie przemienne o zadanej amplitudzie i częstotliwości	
	Sterownik prądu przemiennego	Napięcie przemienne o stałej amplitudzie i częstotliwości	Napięcie przemienne o zadanej amplitudzie	



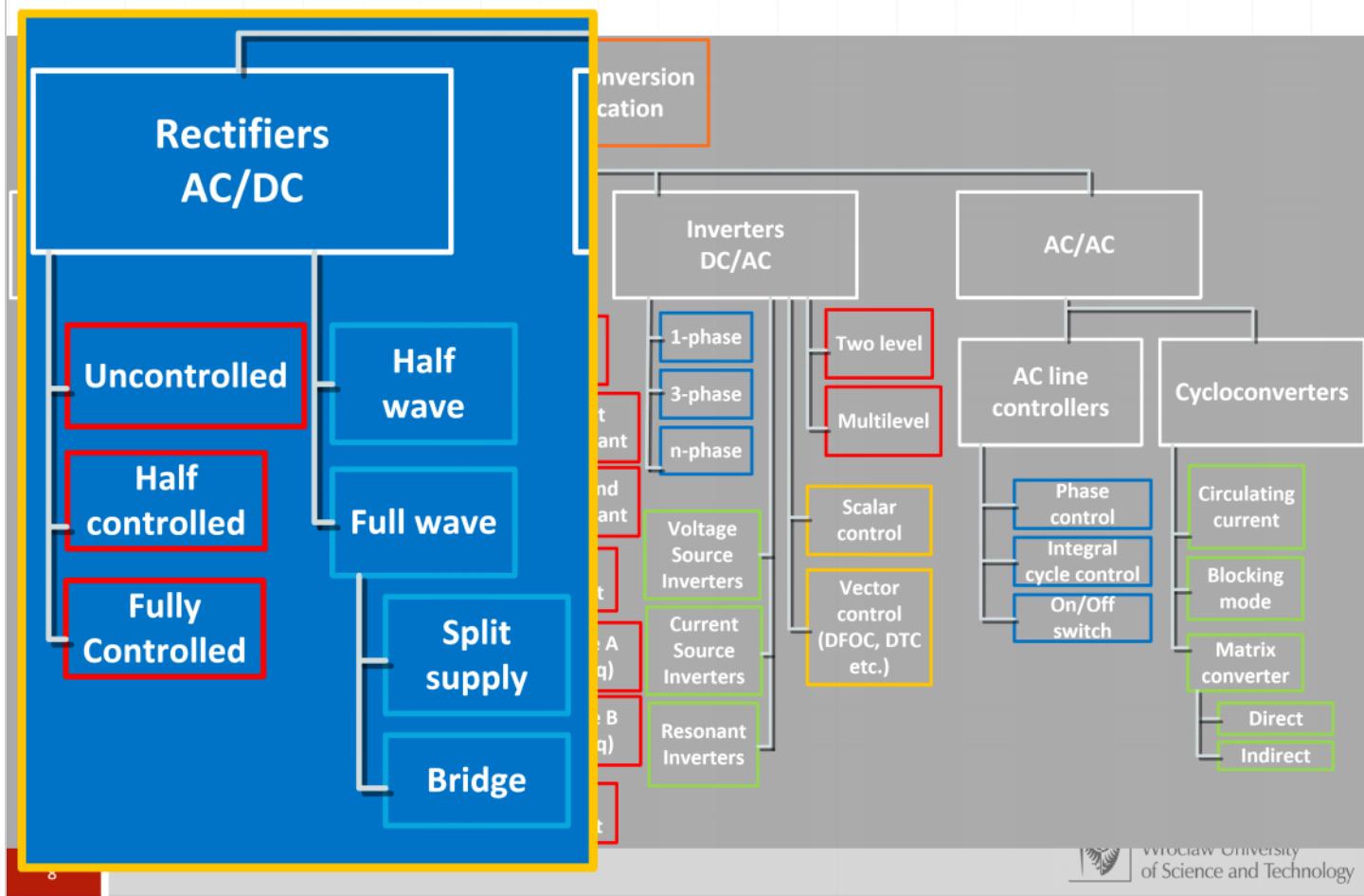
Rodzaje konwersji



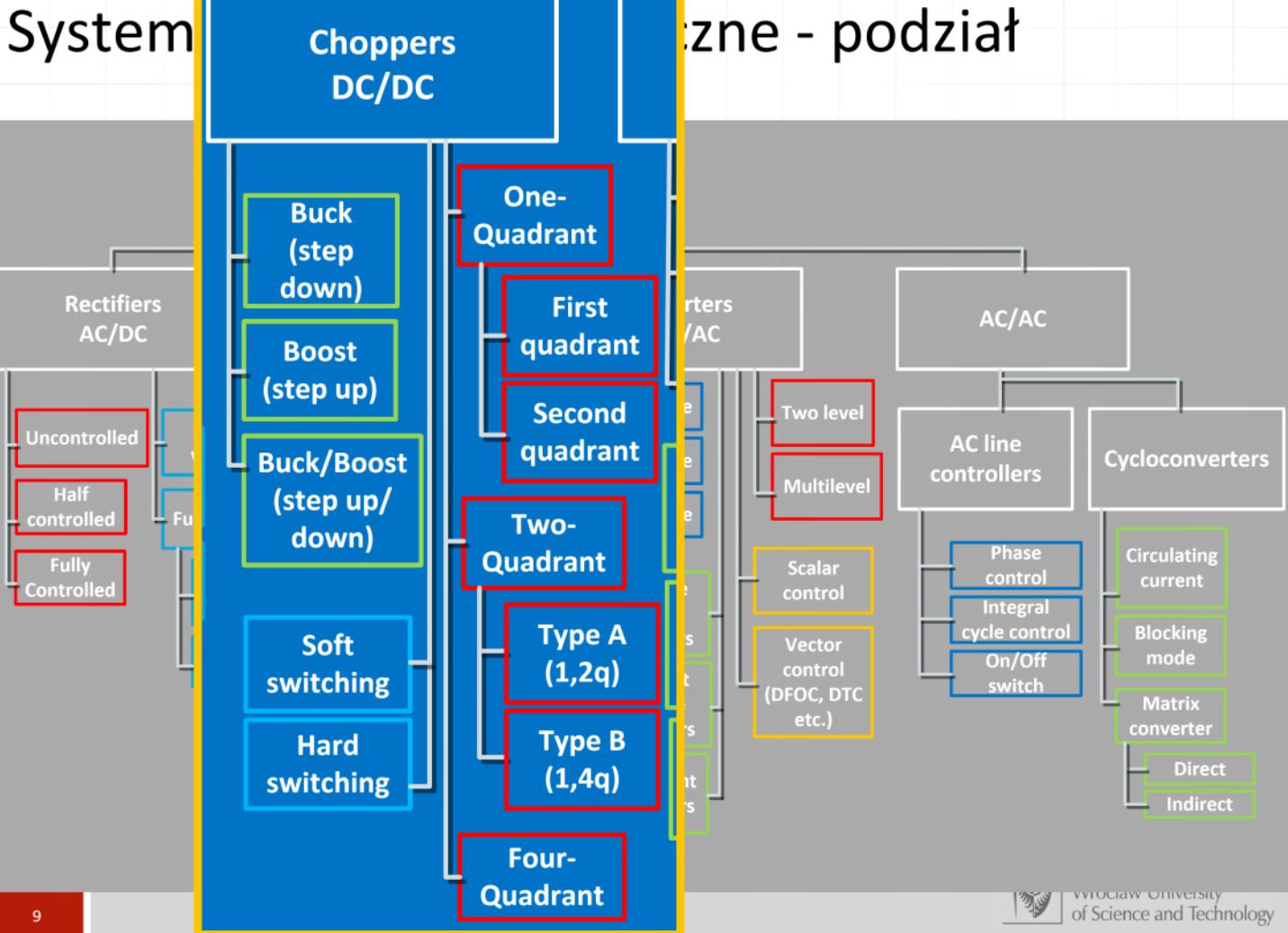
Systemy energoelektroniczne - podział



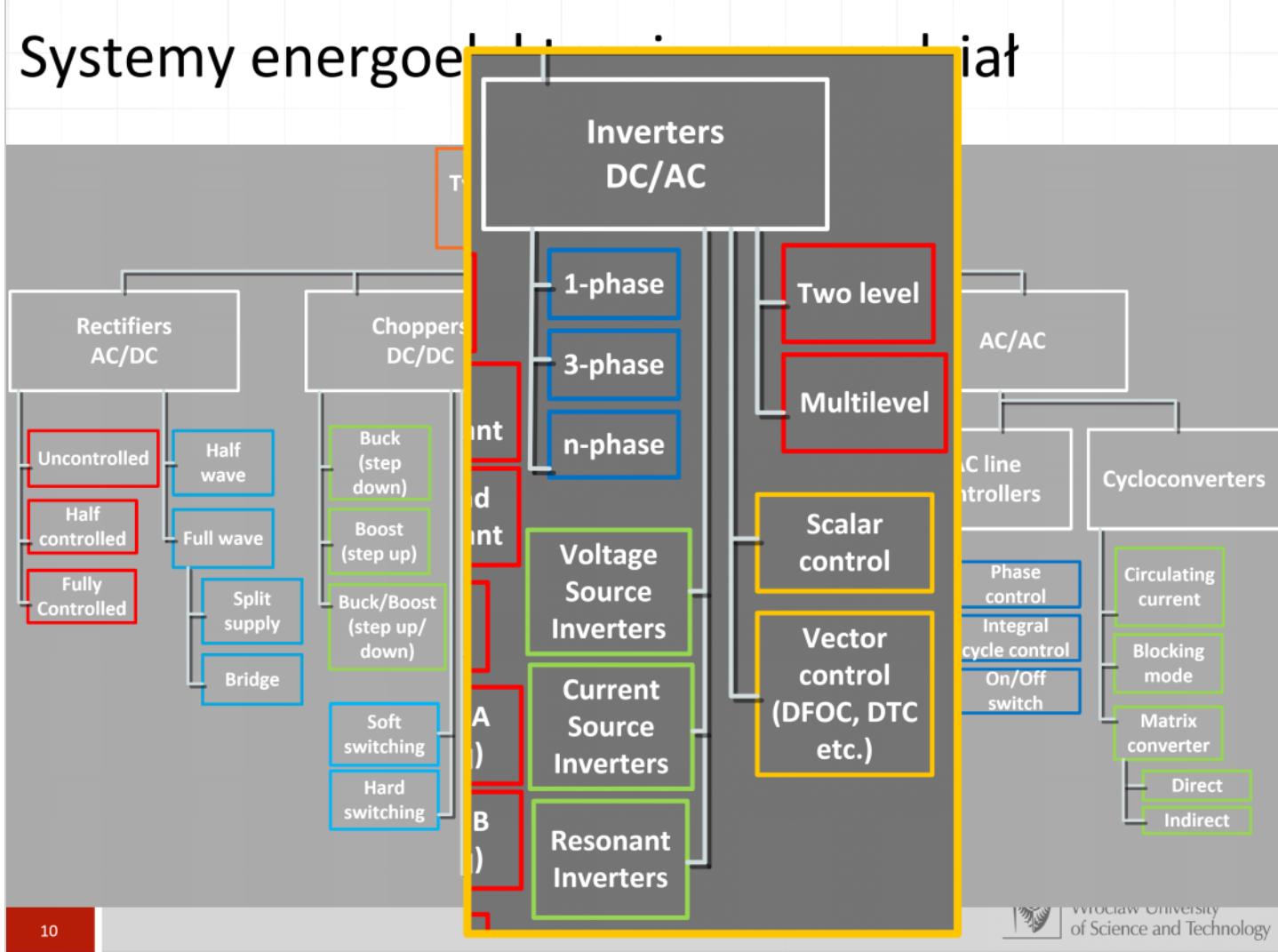
Systemy energoelektroniczne - podział



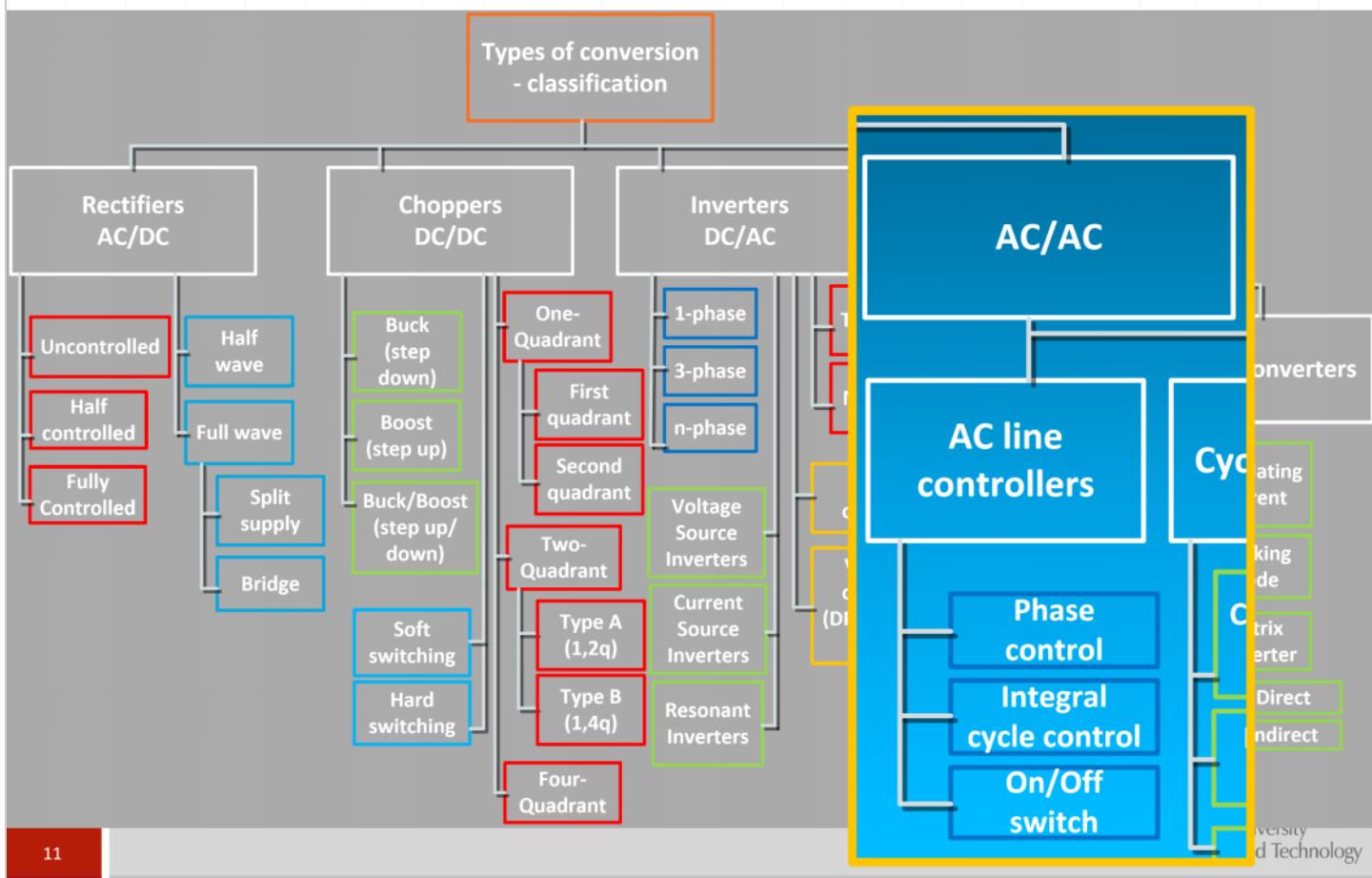
Wroclaw University
of Science and Technology



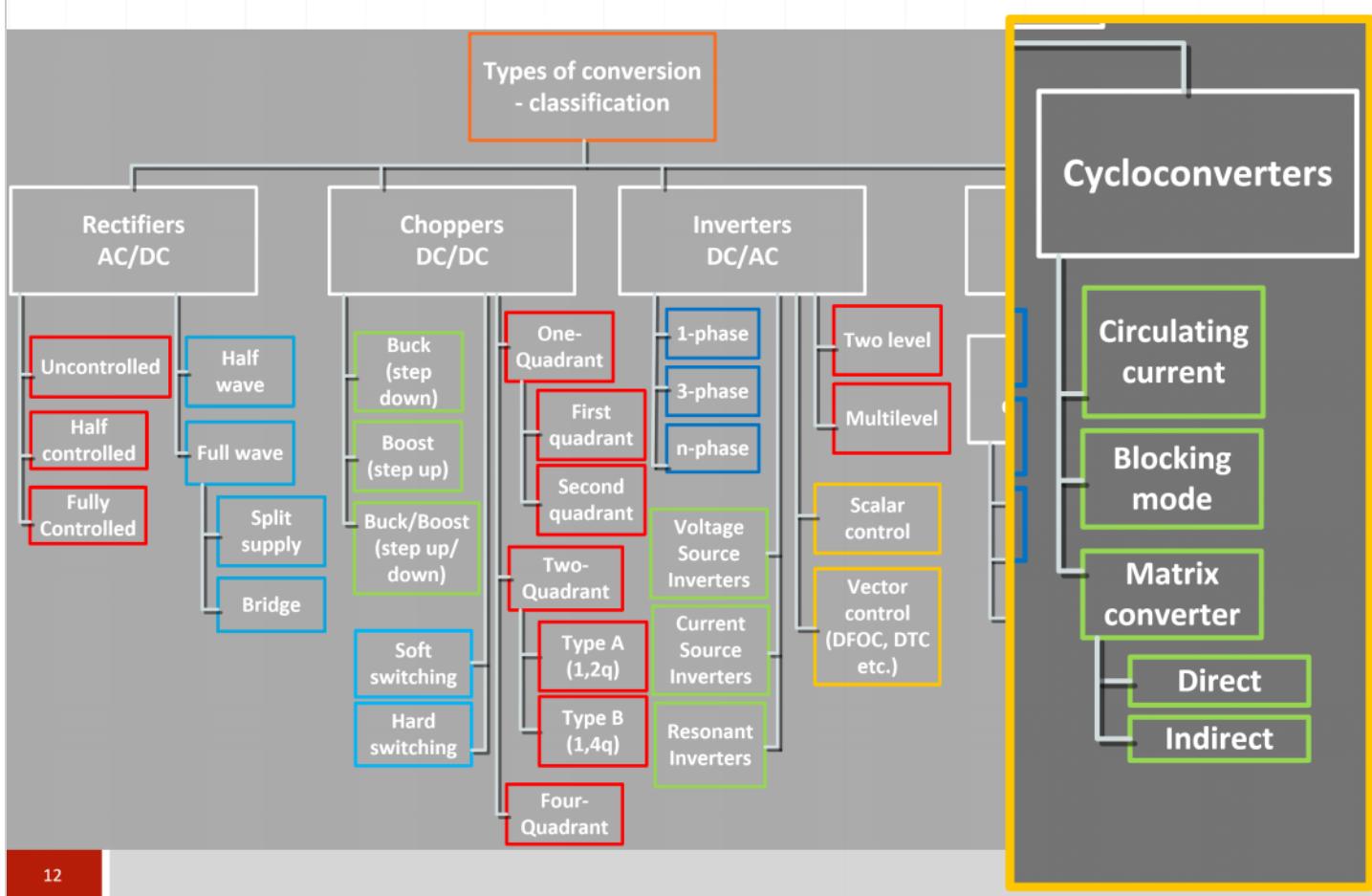
Systemy energoelektroniki



Systemy energoelektroniczne - podział



Systemy energoelektroniczne - podział



Zastosowania energoelektroniki

Główne kategorie zastosowań

Kategoria	Zastosowanie
Napędy elektryczne	Zasilanie silników prądu stałego i przemiennego, np. zasilanie silników indukcyjnych napięciem o zmiennej częstotliwości
Urządzenia domowe	Sterowanie ogrzewaniem, regulacja oświetlenia, elektronarzędzia ręczne, miksery, blendery, itp.,
Napędy pojazdów	Napędy lokomotyw elektrycznych, wózki widłowe, pojazdy elektryczne,
Układy energii odnawialnej	Przetwarzanie energii solarnej, wiatrowej, itp.
Układy mocy	Regulacja mocy biernej, filtr aktywny, elastyczne system transmisji energii AC (FACTS), układy wysokiego napięcia prądu stałego (HVDC)
Inne	Zasilacze bezprzerwowe (UPS), ładowarki do baterii, elektroliza, zastosowania w przestrzeni kosmicznej, elektromagnesy, etc.

Zastosowania energoelektroniki

Zasilacze komputerowe

- Zasilacze komputerowe (ang. Switched Mode Power Supply)
- Kompaktowe, o dużej sprawności (ang. PFC - Power Factor Control)
- ATX (Advanced Technology eXtended) specyfikacja zakłada następujące poziomy napięć: 3.3 V, 5 V, 12 V

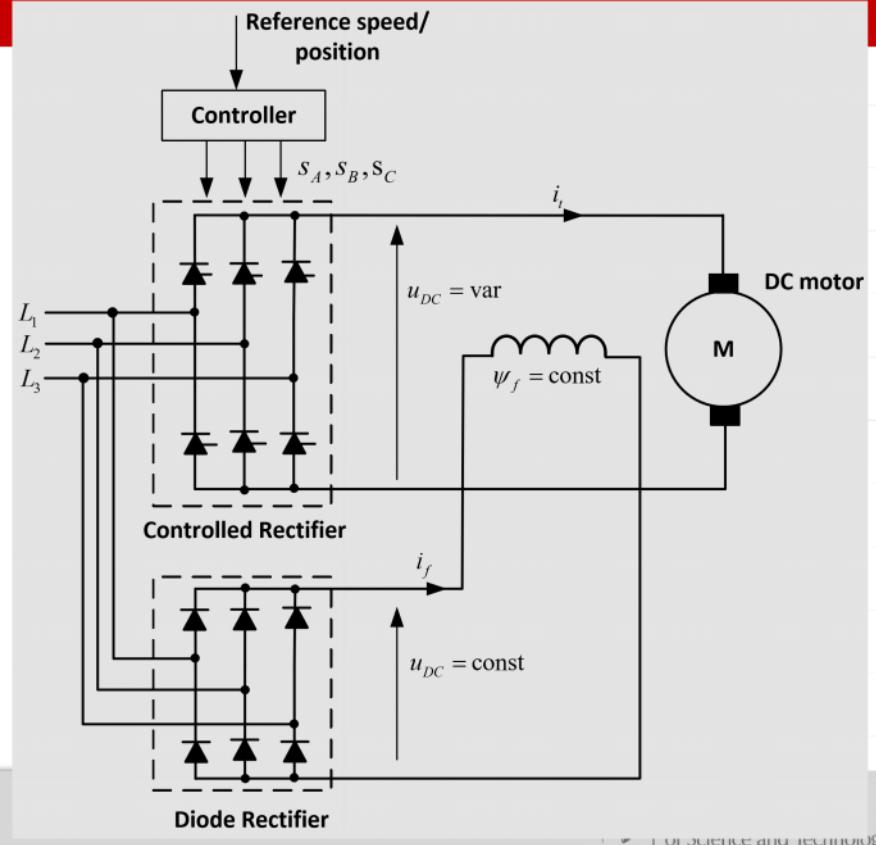
Voltage	Cable Color	Min	Max
12 V	Yellow	11,4 V	12,6 V
5 V	Red	4,75 V	5,25 V
3.3 V	Yellow	3,14 V	3,47 V



Zastosowania energoelektroniki

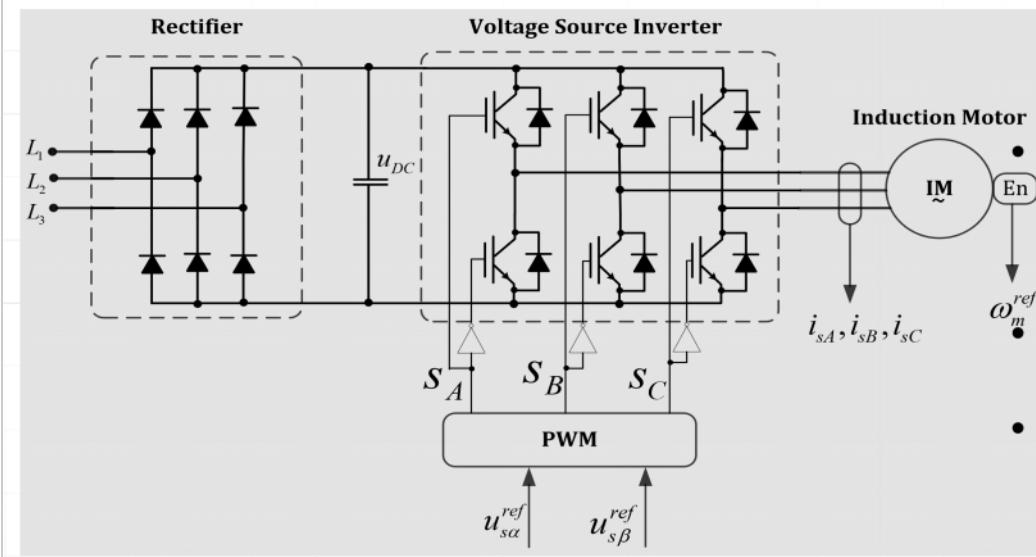
Silnik DC

- Silnik obcowzbudny prądu stałego zasilany z prostownika sterowanego,
- Tylko jeden kierunek obrotów (napięcie tylko dodatnie),
- Uzwojenie wzbudzenia zasilane z prostownika diodowego



Zastosowania energoelektroniki

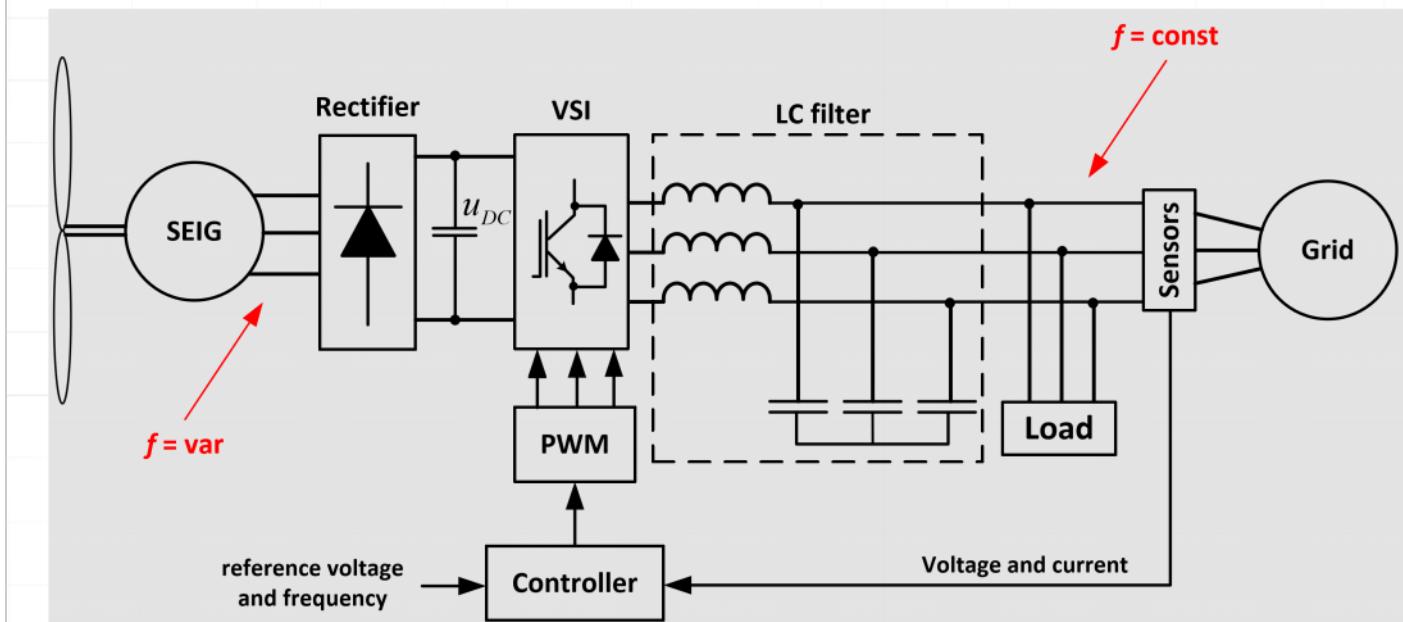
Przemiennik częstotliwości dla silnika indukcyjnego



- Silnik indukcyjny: niski koszt, niezawodność, brak konserwacji, prosta konstrukcja,
- Zmienna częstotliwość wymagana do uzyskania zmiennej prędkości i dużej sprawności,
- Algorytm PWM do sterowania falownikiem,
- Napięcie zasilania falownika (VSI) dostarczane przez napięcie stałe, z prostownika diodowego

Zastosowania energoelektroniki

Energia wiatrowa

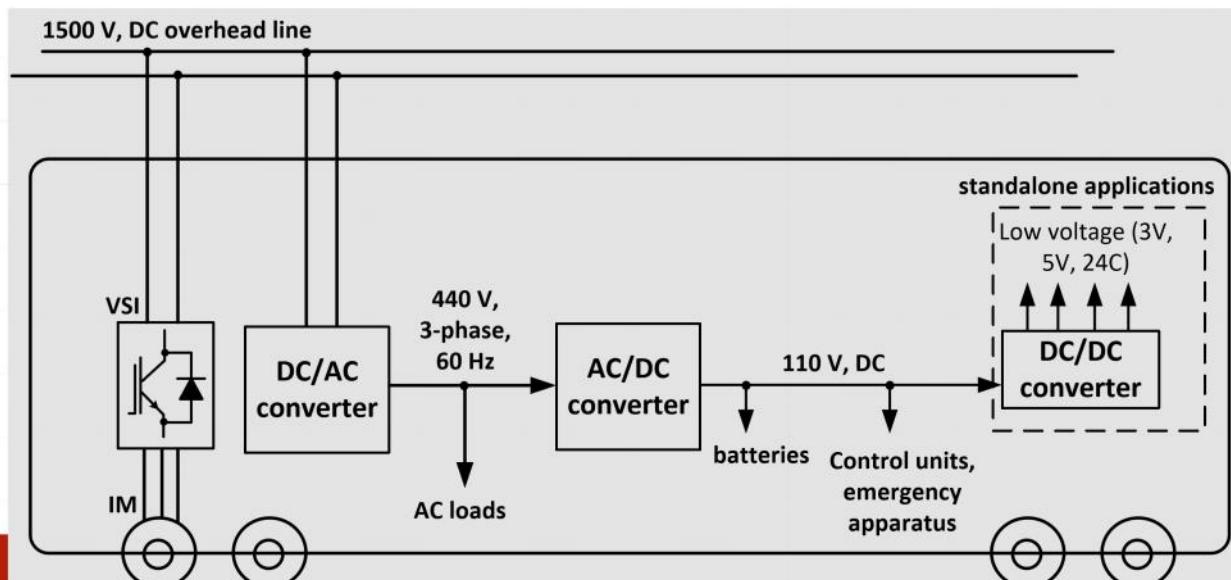


- Napięcie zmienne o zmiennej częstotliwości jest przekształcane na napięcie zmienne o stałej częstotliwości AC

Napędy elektryczne pojazdów

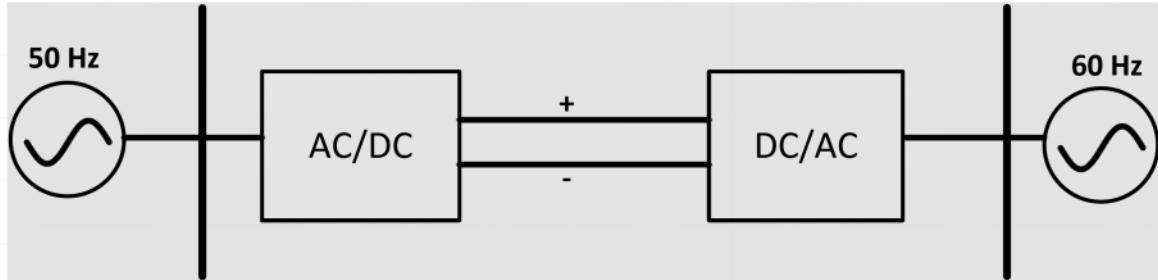


Hong Kong Mass Transit Railway (MTR)



Zastosowania energoelektroniki

Układ wysokiego napięcia HVDC



- Transmisja DC wysokiego napięcia (HVDC) - wykorzystywane są tylko dwa przewody,
- Brak spadku napięcia (utrata mocy) na indukcyjności linii zasilającej
- Możliwy dwustronny przepływ mocy,
- Brak problemów z niestabilnością, jak w przypadku długiej linii zasilającej AC

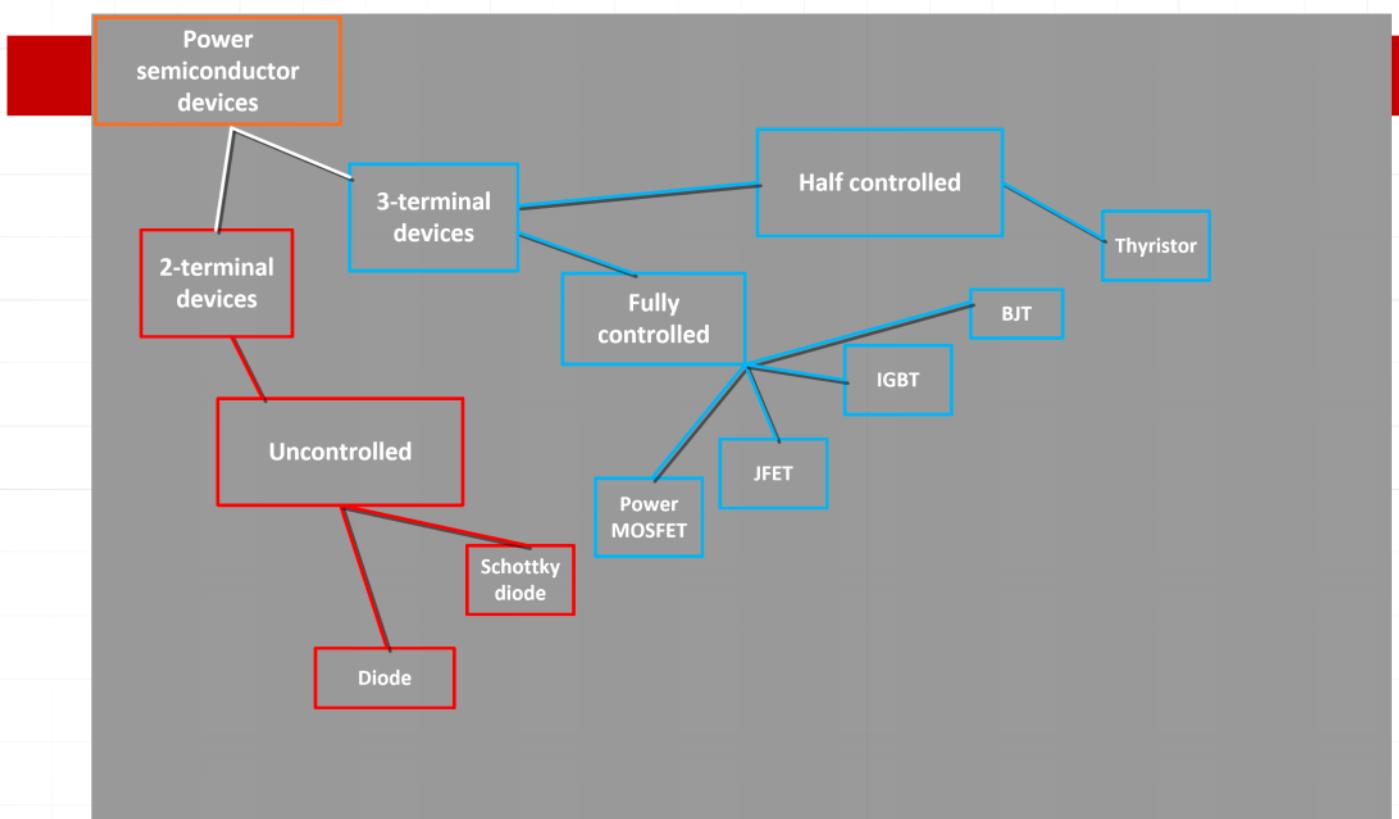
Elementy układu energoelektronicznych

Rodzaje

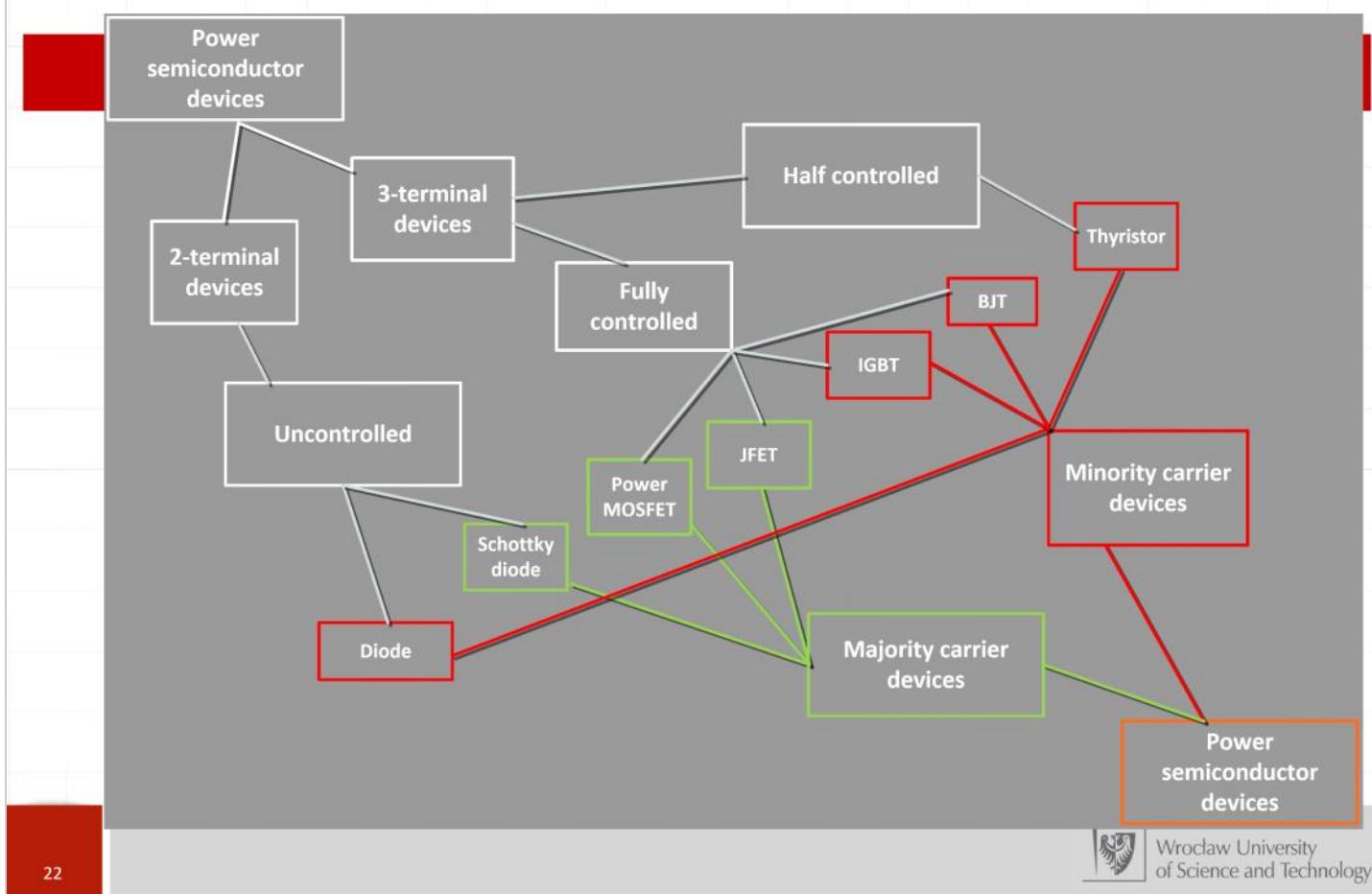
Typ	Opis (skrót)
Diode	Jednokierunkowy przepływ prądu
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
BJT	Bipolar Junction Transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
SCR	Silicon Controlled Rectifier (tyrystor)
TRIAC	Odpowiada dwóm tyrystorom połączonym antyrównolegle
GTO	Gate Turn-off Thyristor
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor



Elementy układu energoelektronicznych



Elementy układu energoelektronicznych



Plan wykładów

Wy1 Nowoczesne półprzewodnikowe przyrządy mocy ich charakterystyki i zakres zastosowania.

Wy2 Układy zabezpieczeń przyrządów i urządzeń półprzewodnikowych mocy. Chłodzenie przyrządów.

Wy3 Zjawisko komutacji i charakterystyki zewnętrzne i charakterystyki sterowania prostowników. Praca falownikowa prostowników sterowanych.

Wy4 Prostowniki niesterowane i o sterowaniu fazowym. Przebiegi czasowe prądów i napięć.

Wy5 Sterowniki o sterowaniu fazowym i łączniki prądu przemiennego.

Wy6 Przekształtniki impulsowe prądu stałego. Przekształtniki obniżające i podwyższające napięcie

Wy7 Falowniki niezależne (autonomiczne) napięcia. Sposoby regulacji napięcia i prądu wyjściowego.

Wy8 Modulacja szerokości impulsów, wektorowe metody modulacji.

Wy9 Falowniki niezależne prądu. Zastosowanie falowników prądu.

Wy10 Przekształtniki sieciowe o poprawionym współczynniku mocy. Filtry aktywne.

Wy11 Przekształtniki rezonansowe. Przekształtniki rezonansowe z przełączaniem przy zerowym prądzie (ZCS) i zerowym napięciu (ZVS).

Wy12 Bezpośrednie przekształtniki częstotliwości. Przekształtniki matrycowe.

Wy13 Podstawowe układy sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi.

Wy14 Podstawowe obszary zastosowania urządzeń energoelektronicznych. Oddziaływanie przekształtników na sieć zasilającą.

Wy15 Kolokwium zaliczeniowe.



Bibliografia

Literatura polskojęzyczna

- [1] Tunia H., Winiarski B.: Energoelektronika. Warszawa WNT 1994.
- [2] Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Półprzewodnikowe przyrządy mocy. Warszawa WKŁ 1999.
- [3] Kaźmierkowski M.P., Matysik J.T.: Wprowadzenie do elektroniki i energoelektroniki. WPW., Warszawa 2005.
- [4] Piróg S.: Energoelektronika. Układy o komutacji sieciowej i twardej. Wydawnictwo AGH. Kraków 2006.



Bibliografia

Literatura anglojęzyczna

- N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, *Power electronics*, John Wiley, 1995
- A. Trzynadlowski, *Introduction to modern power electronics*, John Wiley, 1998
- B. Pelly, *Thyristor phase controlled converters and cycloconverters*, John Wiley-Interscience, 1971
- R.W. Erickson, D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*, Springer Science & Business Media, 2001

Available online (Knovel, MyiLibrary, Wiley Online Library):

- M. H. Rashid, *Power electronics handbook*, Elsevier, 2011
- V. R. Moorthi, *Power electronics: Devices, Circuits and Industrial Applications*, Oxford University Press, 2010
- P. T. Krein, *Elements of Power Electronics*, Oxford University Press, 1998



Dziękuję za uwagę!



Wykład 3

Energoelektronika – prostowniki niesterowane

dr inż. Grzegorz Tarchała

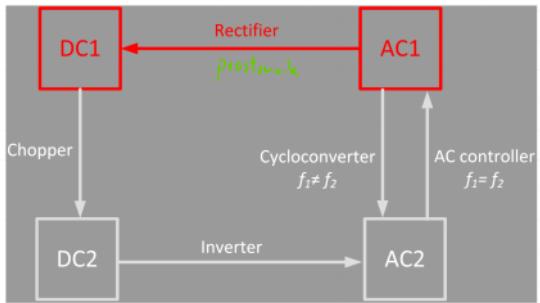


HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Wrocław University
of Science and Technology

Prostowniki

Wstęp



Prostowniki

Plan wykładów

- Prostowniki niesterowane – wykład 3
 - 1-fazowe
 - 1-pulsowe, 2-pulsowe prostowniki niesterowane,
 - Mostek Graetza (?),
 - Zjawisko komutacji,
 - 3-fazowe
 - 3-pulsowe, 6-pulsowe, 12-pulsowe
 - Filtracja napięcia wyjściowego,
- Prostowniki sterowane – wykład 4
 - 1 fazowe, 3 fazowe,
 - Zjawisko komutacji, względnie tam, gdzie prąd płynie przez tranzystory, itd.
 - Charakterystyki zewnętrzne prostowników,
 - Praca falownikowa prostownika,
- Układy sterowania prostownikami – wykład 5 → prostowniki: PWM

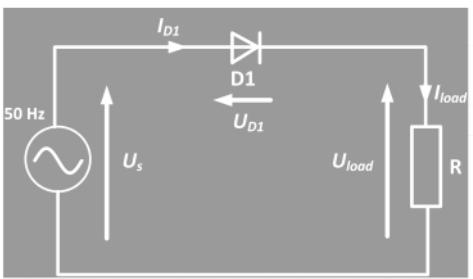
- "praktycznie tylko błąd"
- next wykład: tranzystory, tryristory, itd.

- cztery zadania konwersji przekształtniki

Prostowniki niesterowowane

Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy

Schemat blokowy – obciążenie rezystancyjne

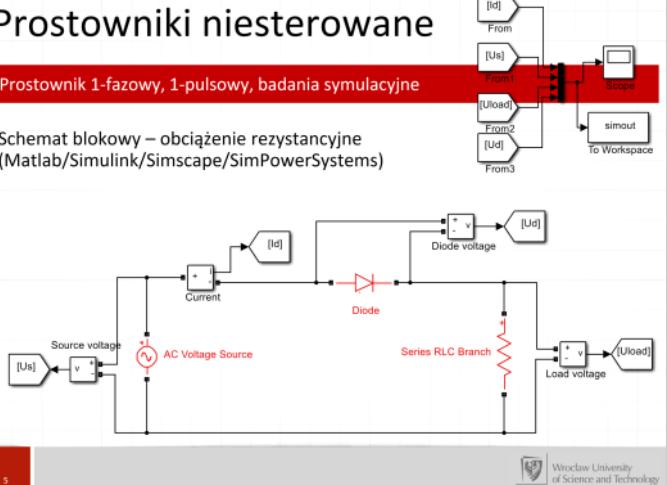


4

Prostowniki niesterowowane

Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy, badania symulacyjne

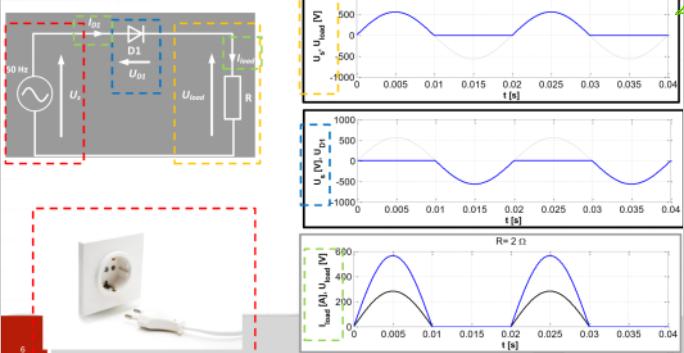
Schemat blokowy – obciążenie rezystancyjne
(Matlab/Simulink/Simscape/SimPowerSystems)



5

Prostowniki niesterowowane

Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy



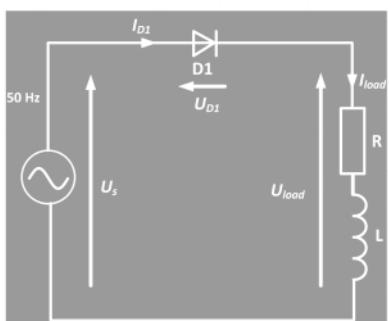
6

- obciążenie: napięcie fali, dodatnie, rezistor
- „dioda” to włącznik / przełącznik w pełni zautomatyzowany
- napięcie ujemne: dioda = przewód w obwodzie
- przekształca prąd i napięcia jest taki sam ha R
- katalogi diod: max. napięcie wtórne, który dioda może wytrzymać

Prostowniki niesterowane

Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy

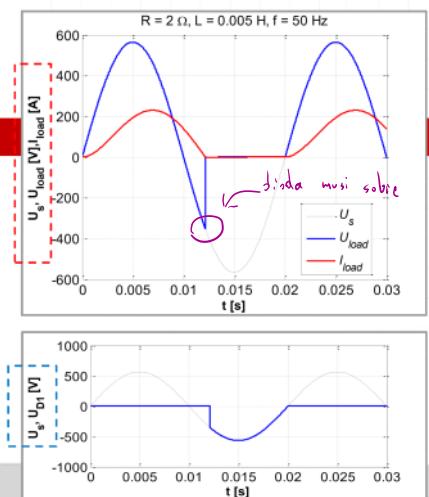
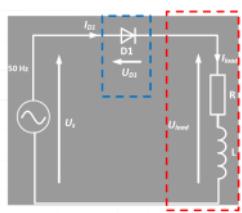
Schemat blokowy obciążenia typu RL



Wrocław University of Science and Technology

Prostowniki niesterowane

1-fazowy, 1-pulsowy



Prostowniki niesterowane

1-fazowy, 1-pulsowy, obciążenie RL

Wartość średnia napięcia:

$$U_{load,MEAN} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{load}(t) dt$$

Wartość skuteczna (RMS) napięcia:

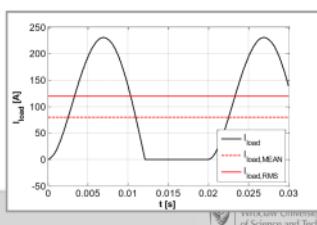
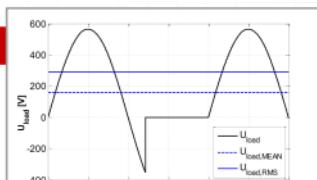
$$U_{load,RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_{load}^2(t) dt}$$

Wartość średnia prądu:

$$I_{load,MEAN} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{load}(t) dt$$

Wartość skuteczna (RMS) prądu:

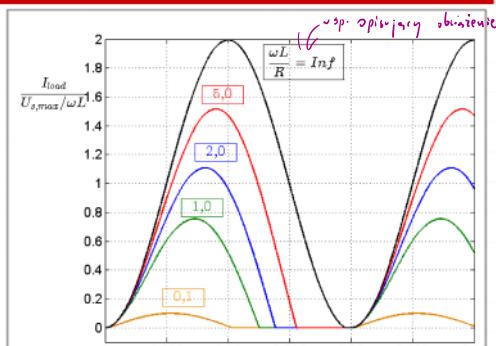
$$I_{load,RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_{load}^2(t) dt}$$



Prostowniki niesterowane

Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy

Kształt prądu w zależności od parametrów obciążenia



- na R napięcie debatuje, na RL prąd nie narasta w tym samym tempie, co napięcie
- następny przepad napięcia → przód lata skurczy
- następny przepad napięcia → lata skurczy się przewód u obw., napięcie na wyjściu jest ujemne

z tym parytaj

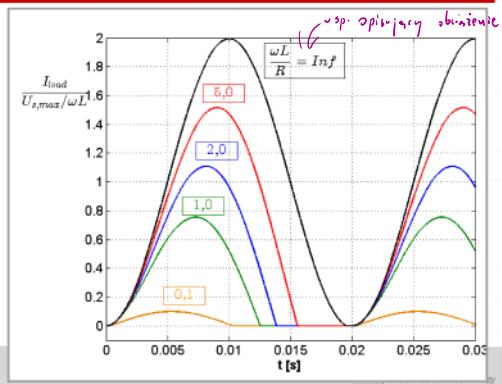
- jeżeli zamraża się zapisar energoelektronika w postaci równań, stosuje się np. metody numeryczne
 - np. "krok wykrojenie równa się"
- nie wykonywać \int_0^T bo w energoelektronice najczęściej nie mamy o sinusoidach
- współczynnik konfaktu: przeliczanie wartości, np. średnich służyć

im większy parametr "Inf", tym prąd wzrasta

Prostowniki niesterowane

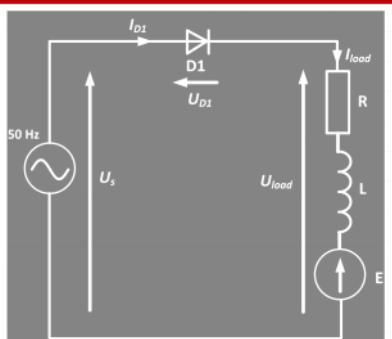
Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy

Kształt prądu w zależności od parametrów obciążenia



Prostowniki niesterowane

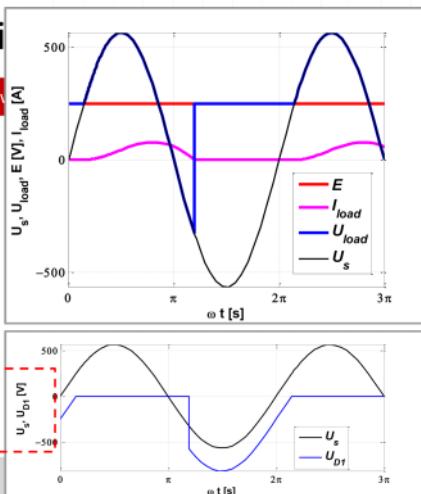
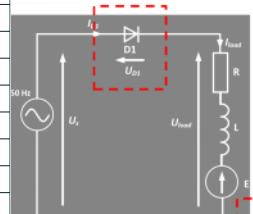
Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy, obciążenie RLE



Wrocław University of Science and Technology

Prostowniki niesterowane

Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy



12

- im mniejszy parametr „Inf”, tym przed wcześniejszymi

- $E \rightarrow$ siła elektromagnetyczna, w ogólnym przypadku napięcie stale dla prądu stałego, zmienne dla zmiennego, etc.
- w zakresie prądu stałego: E zależy od obrotów i strumienia

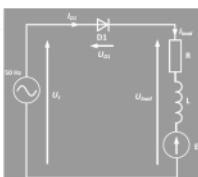
- pozytywne E napięcie zaczyna wzrosnąć, natomiast obciążenia jest niewiele E
- przy ma mniejszej wartości, działa E
- obciążenie $E \rightarrow$ większe prąd

Prostowniki niesterowane

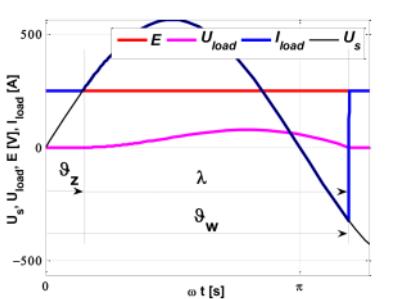
Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy

Kąt wyłączenia:

$$\vartheta_w = \vartheta_z + \lambda$$



13

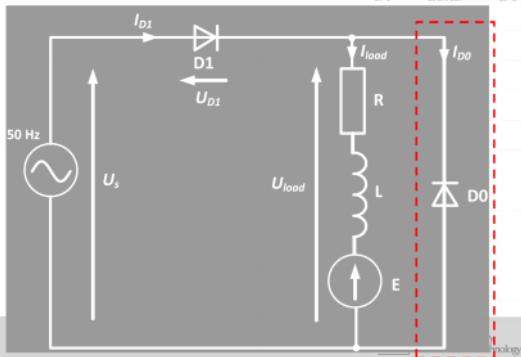


Prostowniki niesterowane

Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy z diodą zerową

$$I_{D1} \neq I_{LOAD}$$

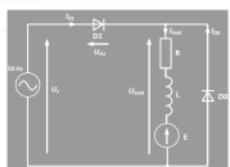
$$I_{D1} = I_{LOAD} + I_{D0}$$



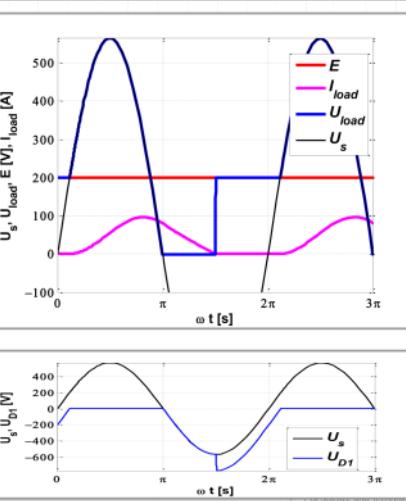
14

Prostowniki niesterowane

Prostownik 1-fazowy, 1-pulsowy z diodą zerową



15



- posługujemy się kątami w en-el:

- kąt przewrócenia - położenie, jeli dłuższy płynie przed

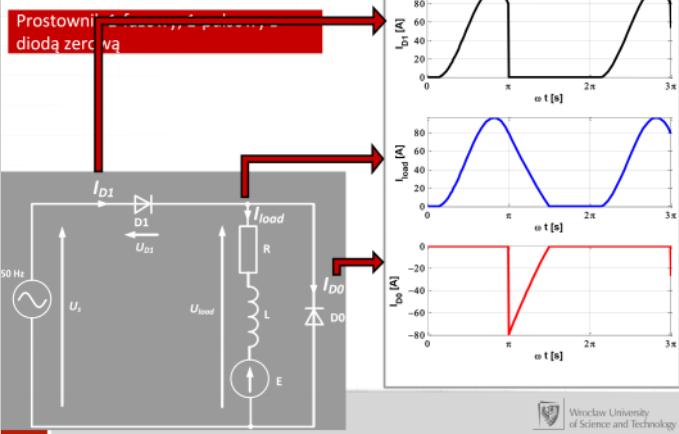
- kąt zatrzymania -

- kąt wyłączenia - do momentu, kiedy przestanie płynie przed

- napięcie napięcia ujemnego: dodatkowe drugie diody, równolegle do obciążenia

- nie ma napięcia ujemnego / powrót na ujemny

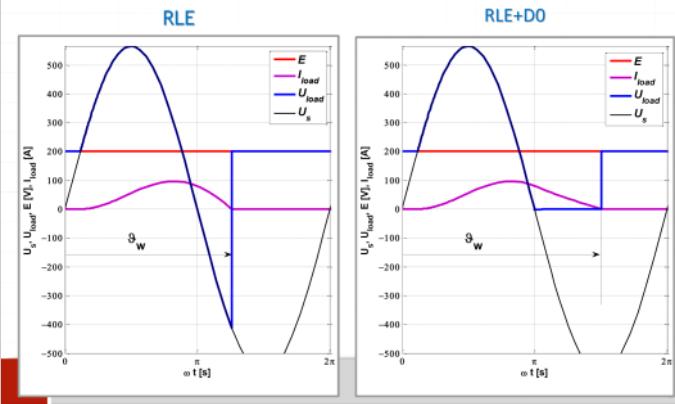
Prostowniki niesterow



- przyj. czterofazowy i czwarty fazą niebieski
-

Prostowniki niesterowane

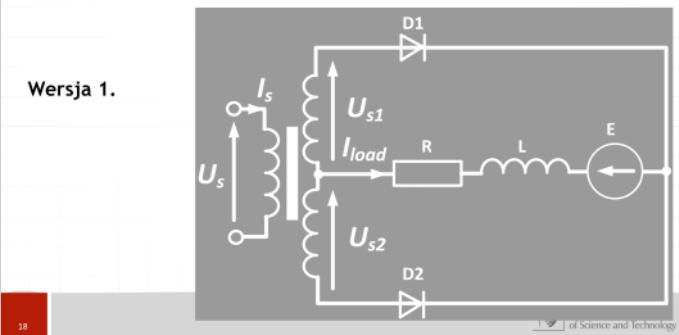
Wpływ diody zerowej



- dla przebiegi w tych samych warunkach, ale bez włączenia się zmieniają

Prostowniki niesterowane

Prostownik 1-fazowy, 2-pulsowy

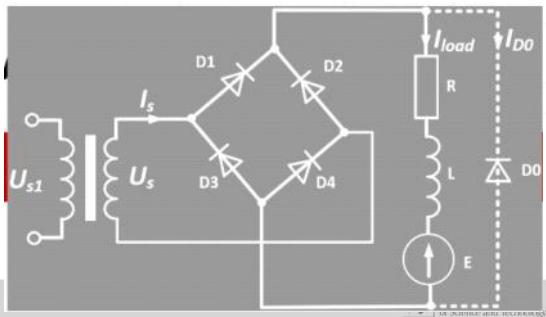


- „Układy liniowe można spotkać”
- 2-pulsowy: 2脉冲 w przebiegu
- 1 wersja: specjalny transformator z dwiema wtyczkami
- lubie diod = liczba pulsów

Prostowniki niesterowowane

Prostownik 1-fazowy, 2-pulsowy

Versja 2.



19

Prostowniki niesterowowane

Mostek Graetza (?)

Leo Graetz, (wrzesień 26, 1856 – listopad 12, 1941)
niemiecki fizyk, urodzony we Wrocławiu (wtedy Niemcy)



Elektronische Zeitung w 1897 – Graetz
spopularyzował wynalazek Karola Pollaka



Wrocław University of Science and Technology

Karol Pollack, (Listopad 15, 1859 - Grudzień 17, 1928) polski wynalazca (98 patentów), urodzony w Sanoku, nazywany polskim Edisonem

20

Prostowniki niesterowowane

Mostek Graetza (?)

Nº 24,398 A.D. 1895



A.D. 1895

Date of Application, 19th Dec., 1895

Complete Specification Left, 19th Sept., 1896—Accepted, 5th Dec., 1896

PROVISIONAL SPECIFICATION.

Improvements in Means for Controlling or Directing Electric Currents.

I, CHARLES POLLAK, of No. 253 Mainzer Landstrasse, Frankfort-on-the-Main, in the German Empire, Managing Director of "The 'Pollak' Accumulator Works," a Joint Stock Company, do hereby declare the nature of this invention to be as follows:—

Wrocław University of Science and Technology

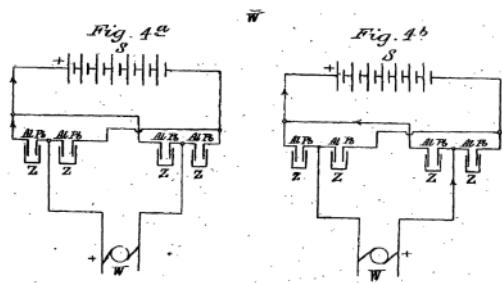
21

• Mostek Graetza

Prostowniki niesterowane

Mostek Graetz'a – patent Polaka Karola Pollaka

S - bateria/odbiornik DC, W - źródło AC, Z - ognisko galwaniczne



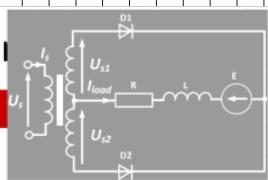
- forma elektrochemiczna
- ALPLd → diody = masyk Graetz'a

22

Wrocław University of Science and Technology

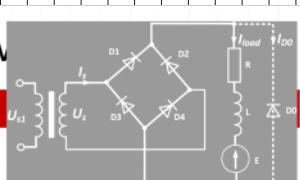
Prostowniki niesterowane

Prostownik 1-fazowy, 2-pulsowy, wersja 1

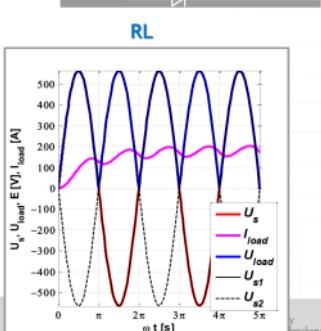
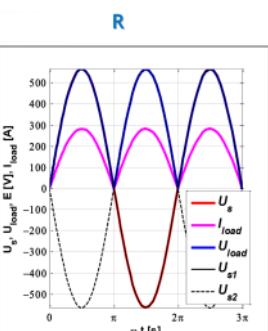


Prostowniki niesterowane

Prostownik 1-fazowy, 2-pulsowy, wersja 2

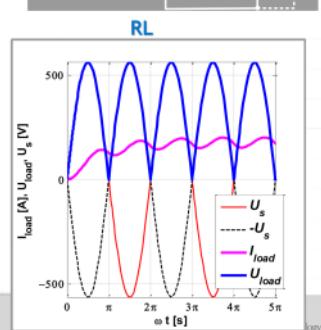
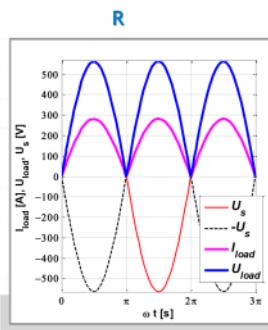


23



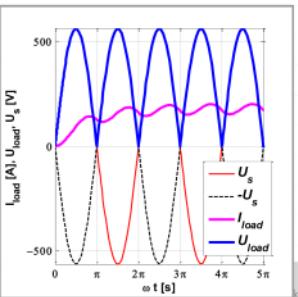
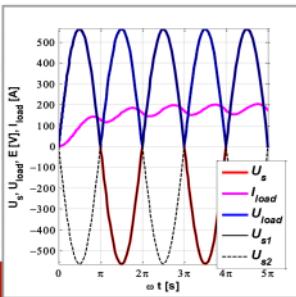
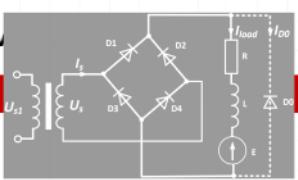
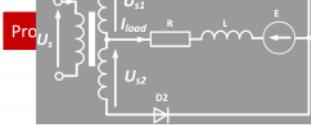
- kształty U_i i I są takie same
- na wyjściu \Rightarrow 2 napięcia będące mili napięć najwyższych
- $RL \rightarrow$ mniejszy poziom oscylacji

24

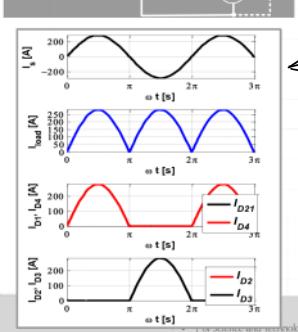
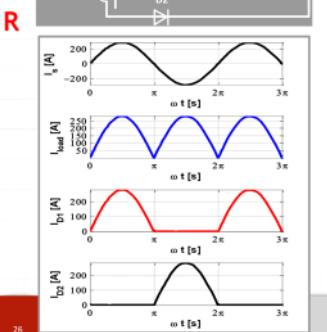
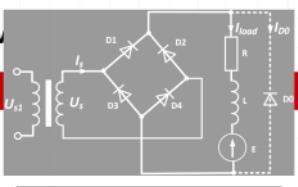
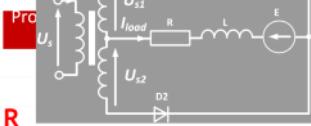


- przebragi zupełnie identyczne jak wyrz
- zalety: brak dielektrycznego zwijania wewnątrz, mała gęstość wykonania w stanie złożonej formie

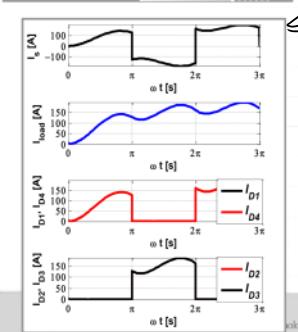
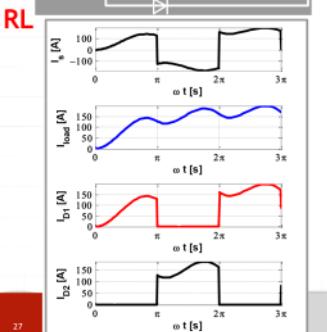
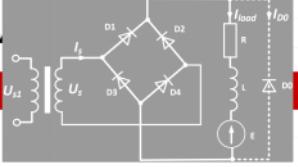
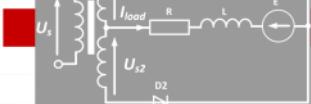
Przemiennikov



Przemiennikov



Przemiennikov



27

NAPĘTÓWKA

ology

PRĄDY

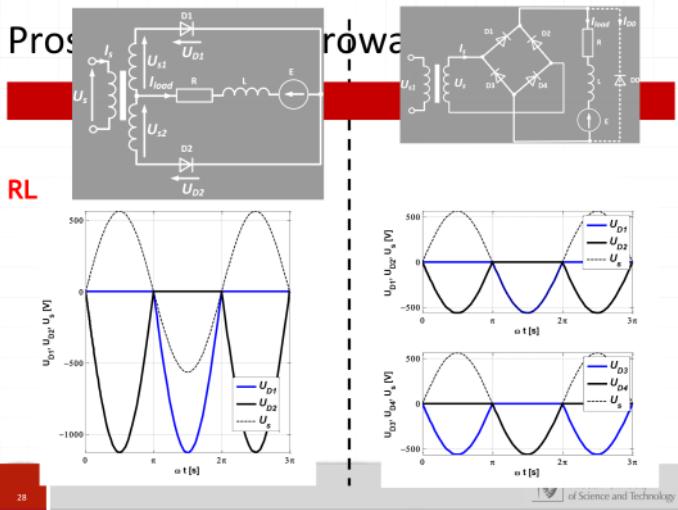
prąd zasilający, brak wyższych harmonicznych

nap. sinusoidalne + obciążenie $RL = \text{taki prąd}$

prąd pobierany zasilającym do prostownika

- prąd prostobiegunowy zawiera najwyższą ilość harmonicznych spowodowanych przez bieguna

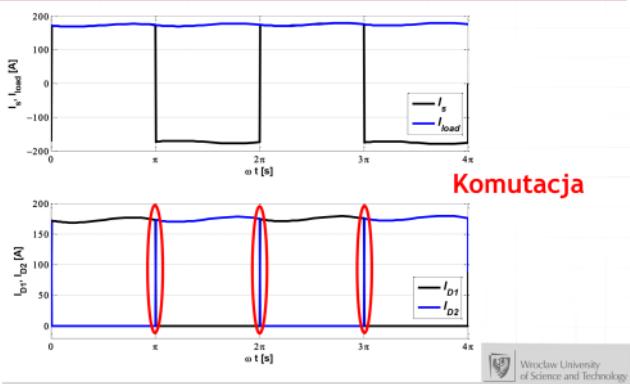
- prąd odbierający porządkowe napięcia spadki napięć na przyczepach i porządkowe zakłócenia w sieci



- I zjawisko: dwukrotne wcięcie napięcia napięcie ujemne
- dalszej: transformator + ujemne napięcie

Prostowniki niesterowane

Zjawisko komutacji



- KOMUTACJA** – zjawisko w en-el, działa w sposób dyskretny
W zależności od okładki, prąd płynie przez jedną LUB przez dwie diody,
- jeśli mamy dwie b. stały przepływ prądu
- KOMUTACJA** – przejmanie przewodzenia między jednym a drugim kątowikiem
- w rzeczywistości komutacja trwa przez jakiekolwiek chwilę
- wykazywanie tyristora w wyniszczając sposób – komutacja wyniszczona
- komutacja na diodzie – „naturalna”

Prostowniki niesterowane

Komutacja

Definicja zjawiska komutacji:

Komutacja – zmiana przewodzenia prądu z jednego łącznika na drugi

Rodzaje komutacji:

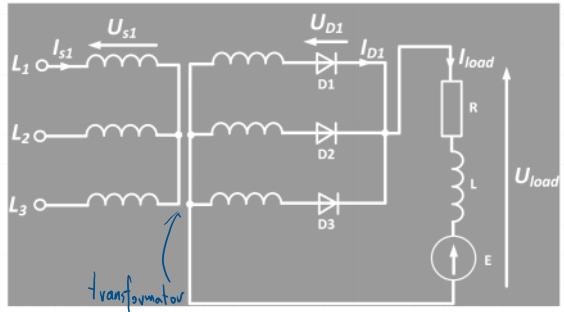
- Naturalna (zewnętrzna)
- Wymuszona:
 - Prądowa
 - Napięciowa

Rodzaje komutacji:

- Prosta – dwa łączniki
- Złożona – trzy lub więcej łączników

Prostowniki niesterowowane

Prostownik 3-fazowy, 3-pulsowy

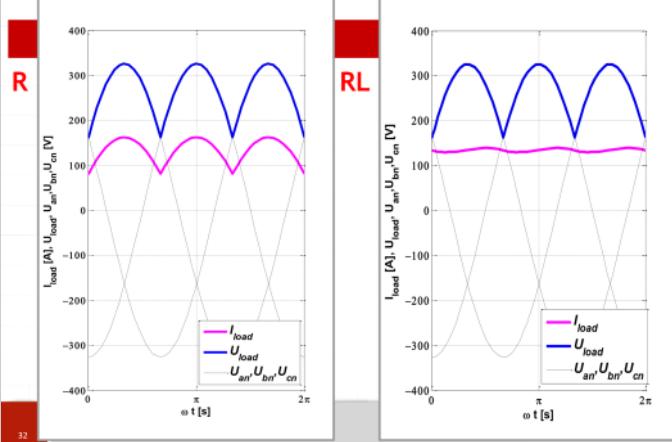


- układ 3-pulsowy w 1-fazowym: nonsens

- 3 fazowy: 3 diody, 3脉冲

31

Prostowniki niesterowowane



- układ symetryzujący

- 2faz → jeden diod, 3脉冲

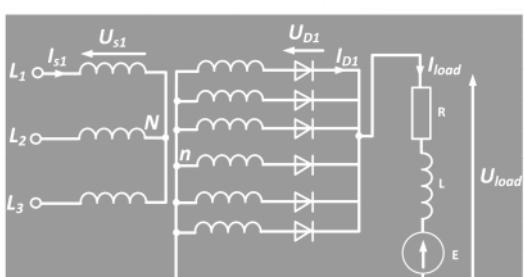
- 脉冲 nie natryka się 0, dwie nittsy poziomu zasyfakci w porównaniu do poprzednio omawianego układów

32

Prostowniki niesterowowane

Prostowniki 3-fazowe, 6-pulsowe

Wersja 1
Topologia podwójnej gwiazdy.
Transformator z dostępnym punktem gwiazdowym po stronie wtórnej.



- układ z włączeniem wtórnym z 6 napiętiami

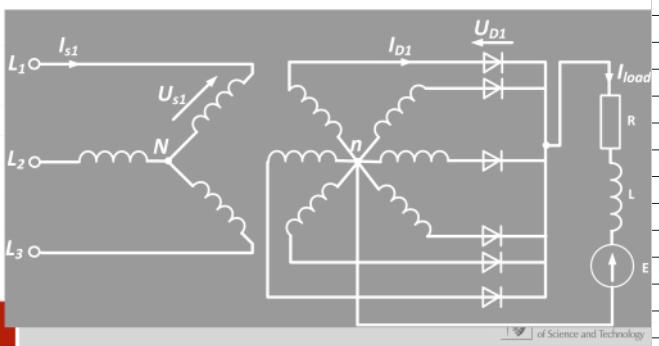
- 6 diod, 6脉冲

33

Prostowniki niesterowowane

Prostowniki 3-fazowe, 6-pulsowe

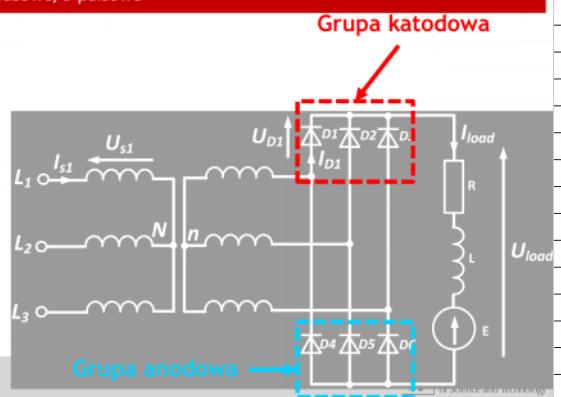
Versja 1



Prostowniki niesterowowane

Prostowniki 3-fazowe, 6-pulsowe

Versja 2.
Prostownik
mostkowy



Prostowniki

Prostowniki 3-fazowe, 6-pulsowe

Amplituda
napięcia DC:

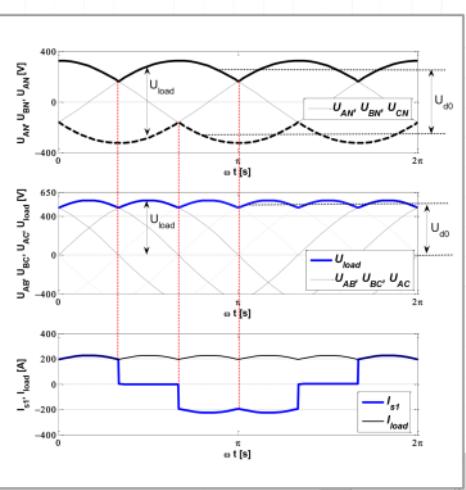
$$U_{load,max} = \sqrt{2} \sqrt{3} U_{AN}$$

Wartość średnia
napięcia DC:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{AN}$$

$$= 2.34 U_{AN}$$

36



- to samo, co wyżej - narysowane w sposób przyjazny!

• podobnie jak mostek Graetza

• układ spotykany praktycznie wszędzie

* • grupa katodowa i anodowa - katody diod lub anody diod są połączone ze sobą

K K
katoda

• wersja „wygubiona”

• napięcie powszechnie stale po dokończeniu L będzie

• napięcie między fazami

• wybieramy zawsze napięcie najwyższe jako napięcie

Prostowniki niestero

Prądy

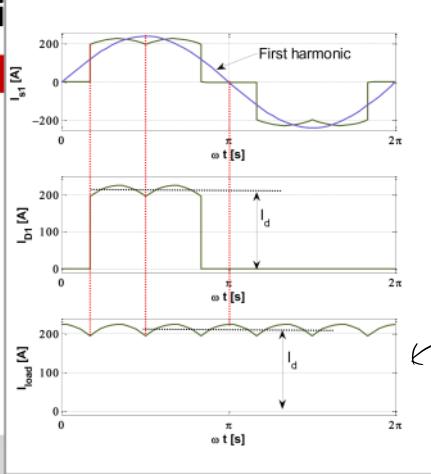
Maximum value of current first harmonic:

$$I_{s1,I} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d$$

RMS value of diode current:

$$I_{D1,RMS} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d = 0,577 I_d$$

37



- przebieg schodkowy

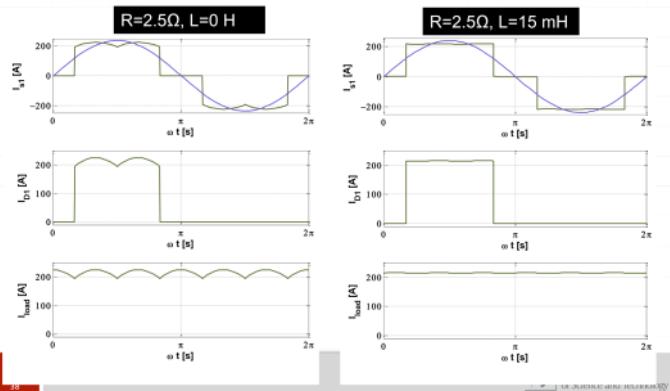
- często stosuje się filtry przed przekształtnikami

-

prąd na wyjściu

Prostowniki niestero

Porównanie typów obciążzeń

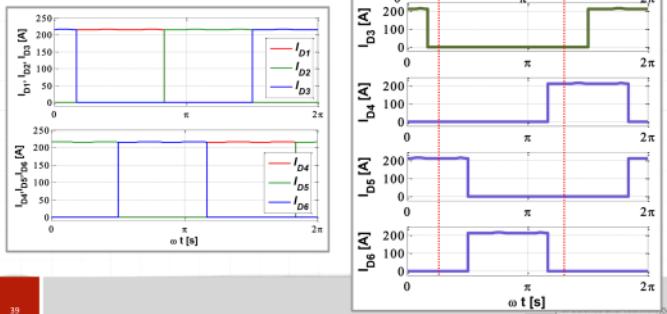


38

- nie jest taka duża różnica jak poprzednio

Prostowniki niestero

Sekwencja



39

- karta dioda → przepływa ją przez niz 2 pulsy

- w każdym momencie muszą przewodzić 2 diody

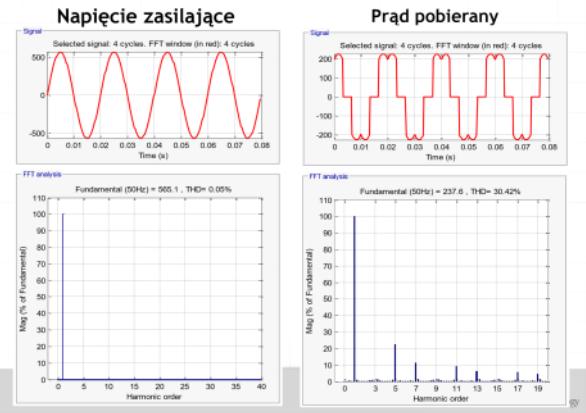
- np. dioda 1; 5, 1; 6

- zmienia się konfiguracja → konwatoria

- sygnały przewinione o $\frac{2\pi}{8}$, m.in. fazami

Prostowniki niesterowane

Analiza harmonicznych (FFT)

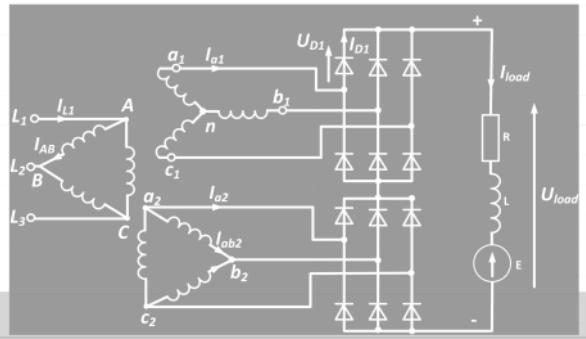


40

Prostowniki niesterowane

Prostownik 3-fazowy, 12-pulsowy

Wersja 1. Połączenie szeregowe

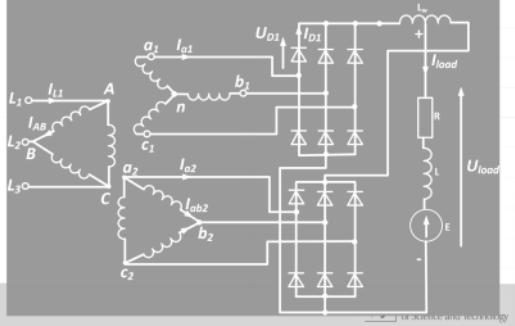


41

Prostowniki niesterowane 3-phase 12-pulse rectifier

Prostownik 3-fazowy, 12-pulsowy

Wersja 2. Połączenie równoległe



42

• brak 3 harmonicznej: występuje tylko wtedy, gdy układ jest niesymetryczny

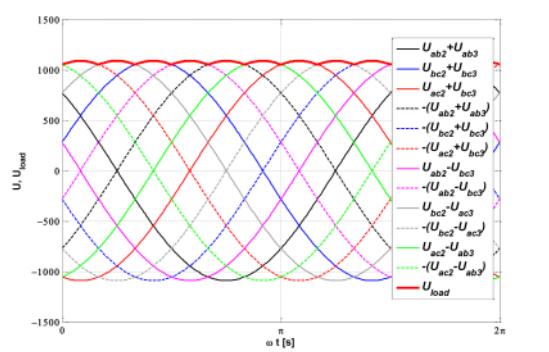
• THD ~ 30%, wartości nieodpowiedzane (prawie żadne)
↳ wsg. = niekorzystanie siły siły

• 2 grupy prostowników na wyjściu

Prostowniki niesterowowane

Prostownik 3-fazowy, 12-pulsowy

Wersja 1.



43

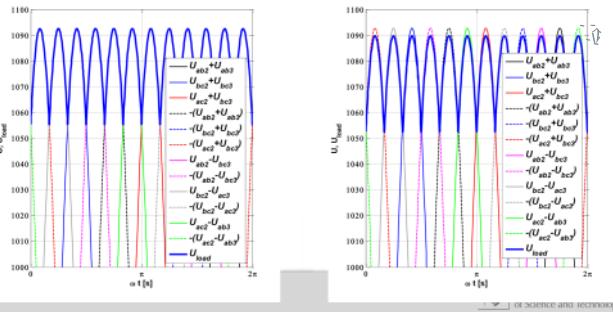
Prostowniki niesterowowane

Prostownik 3-fazowy, 12-pulsowy

Wersja 1.

$U_f = 0.0 \text{ V}$

$U_f = 0.7 \text{ V}, U_d = 4U_f$



44

Spadek napięcia w diodek

Prostowniki niesterowane

Podsumowanie

$$\text{DC napięcie DC dla } q-\text{pulsowego prostownika} \\ U_{d0} = \frac{q}{2\pi} U \sqrt{2} \int_{-\pi/q}^{\pi/q} \cos \vartheta d\vartheta = U \sqrt{2} \frac{q}{\pi} \sin \frac{\pi}{q}; \\ q \neq 1; \\ \vartheta = \omega t$$

Napięcie DC dla k połączonych szeregowo q-pulsowych prostowników napięcia

$$U_{d0} = k U \sqrt{(2)} \frac{q}{\pi} \sin \frac{\pi}{q}$$

Współczynnik pulsacji prostownika q-pulsowego

$$P = \sqrt{\left(\frac{U_{drms}}{U_{d0}}\right)^2 - 1}$$

45

nowość! $U_{drms} : U_{d0} \rightarrow P = 0 \rightarrow \text{brak pulsacji}$

Prostowniki niesterowane

Podsumowanie

Napięcie skuteczne:

$$U_{d0rms} = \sqrt{\frac{q}{2\pi}} \int_{-\frac{\pi}{q}}^{\frac{\pi}{q}} (U\sqrt{2} \cos \vartheta)^2 d\vartheta = U\sqrt{2} \sqrt{\frac{q}{2\pi} \left[\frac{\pi}{q} + \sin \frac{\pi}{q} \cos \frac{\pi}{q} \right]}$$

Współczynnik pulsacji:

$$p = \sqrt{\frac{q}{2\pi} \left(\frac{\pi}{q} + \sin \frac{\pi}{q} \cos \frac{\pi}{q} \right) - 1}$$

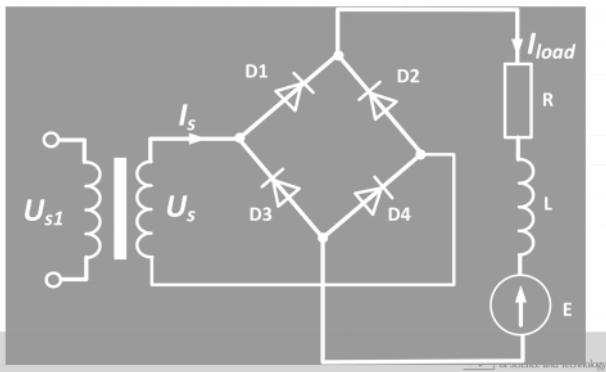
q	2	3	4	6	12	∞
$U_{d0}/U\sqrt{2}$	0,636	0,826	0,894	0,955	0,999	1,0
p	0,47	0,17	0,089	0,04	0,014	0,0

46

Wroclaw University
of Science and Technology

Prostowniki niesterowane

Mostek Graetz'a

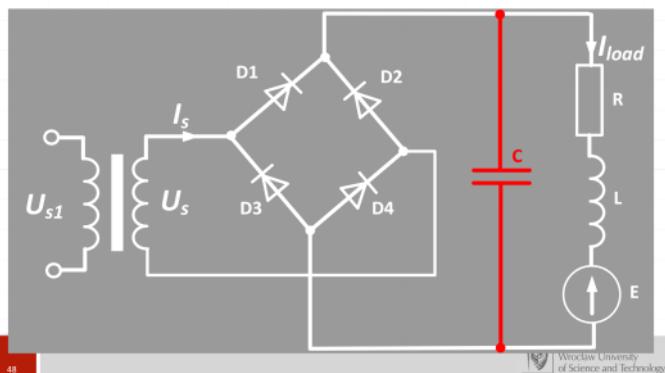


47

Wroclaw University
of Science and Technology

Prostowniki niesterowane

Filtracja napięcia wyjściowego



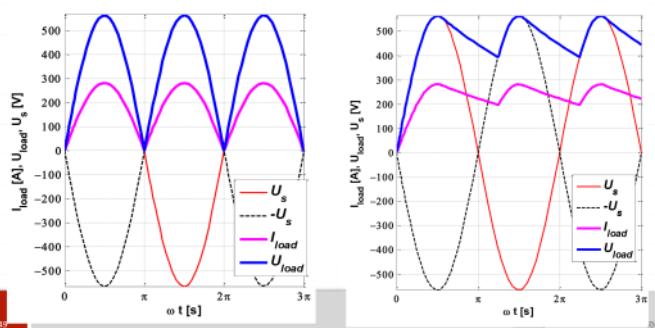
48

Wroclaw University
of Science and Technology

- * na kolejne moze byc połączenie przewodów z kondensatorami o wykresy

Prostowniki niesterowane

Filtracja napięcia wyjściowego



49

Dziękuję za uwagę!

50

Wykład 4

Energoelektronika

– prostowniki sterowane

dr inż. Grzegorz Tarchała



HO EXCELLENCE IN RESEARCH

Wrocław University
of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Plan wykładu

- Prostowniki sterowane:
 - Prostowniki sterowane 1-fazowe:
 - 1-pulsowy,
 - 2-pulsowy:
 - Zjawisko komutacji, spadek napięcia,
 - Praca falownikowa prostownika,
 - Prostowniki sterowane 3-fazowe:
 - Klasifikacja prostowników 3-fazowych,
 - 3-pulsowy,
 - 6-pulsowy prostownik mostkowy:
 - Sekwencja sterowania
 - Rodzaje prądów obciążenia
 - Praca falownikowa
 - Charakterystyki sterowania
 - Charakterystyki wyjściowe
 - Zjawisko komutacji, spadek napięcia
 - Prostownik pół-sterowany

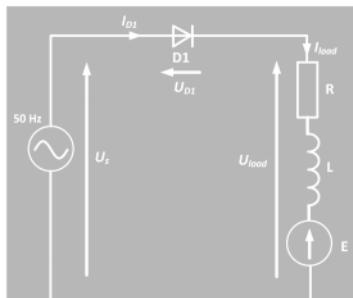
2

Wrocław University
of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Prostownik niesterowany 1-fazowy, 1-pulsowy

Schemat blokowy prostownika niesterowanego



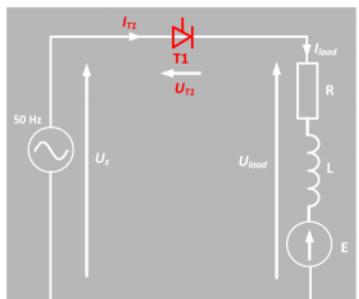
3

Wrocław University
of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany 1-fazowy, 1-pulsowy

Schemat blokowy prostownika sterowanego

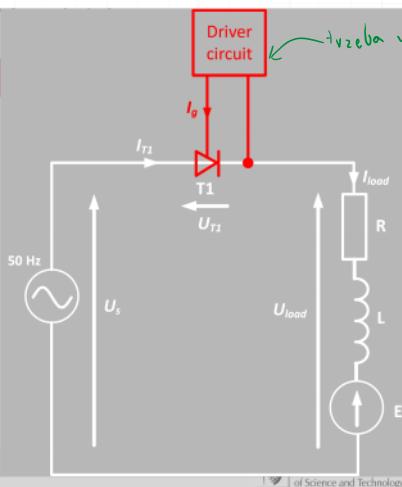


• prostownik niesterowany: dioda ; sterowany: tyrystat

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany 1-fazowy, 1

Schemat blokowy prostownika sterowanego wraz z układem sterowania prądem bramki



• trzeba wzmocnić przełącznik przy użyciu obwodów

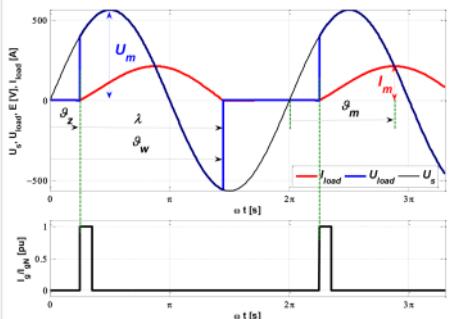
• w sygnale sterującym wzmuszamy przełącznik prądu

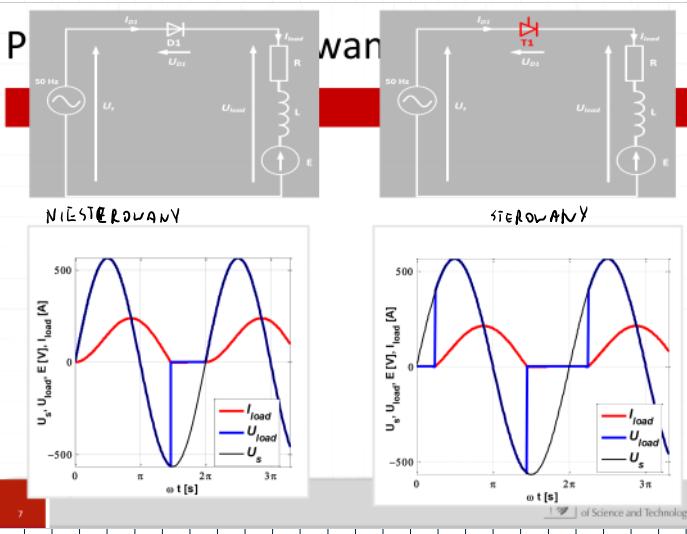
Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany 1-fazowy, 1-pulsowy

Charakterystyczne kąty:

- ϑ_z – kąt sterowania,
- ϑ_w – kąt wyłączania
- ϑ_m – kąt maksymalnego prądu
- λ – kąt przewodzenia



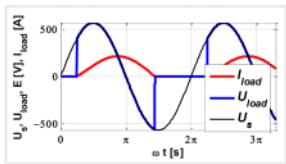


- nie ma możliwości zwiększenia ujemnego zanurzenia

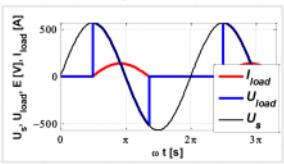
Prostowniki sterowane

Porównanie przebiegów prądu i napięcia dla różnych wartości kąta ϑ_z

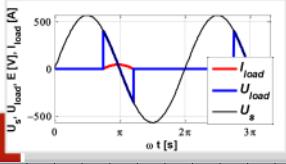
$$\vartheta_z = 45^\circ$$



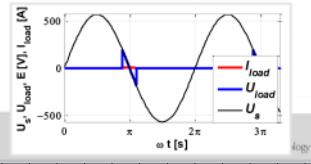
$$\vartheta_z = 90^\circ$$



$$\vartheta_z = 135^\circ$$

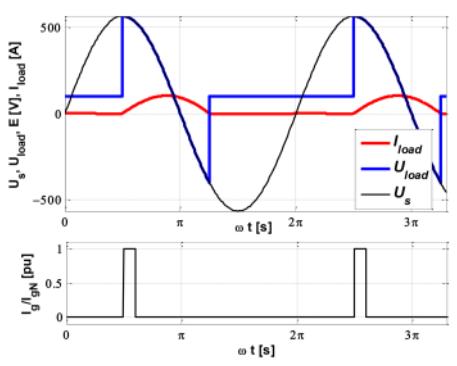


$$\vartheta_z = 160^\circ$$



Prostowniki sterowane

Obciążenie typu RLE

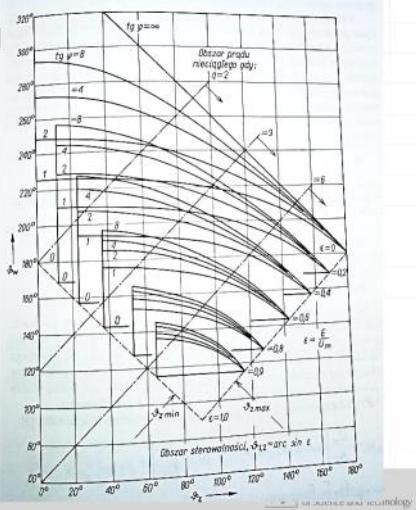


Prostowniki sterowane

Charakterystyki kąta wyłączenia prostownika sterowanego

Kąt wyłączenia:

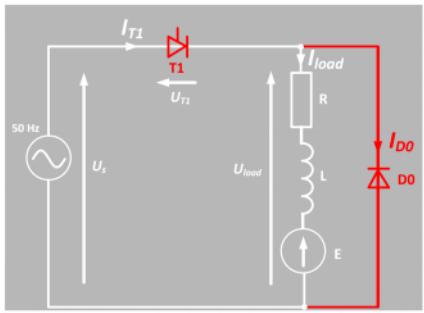
$$\vartheta_w = f(\vartheta_z, \varphi, \varepsilon)$$



10

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany 1-fazowy, 1-pulsowy z diodą zerową



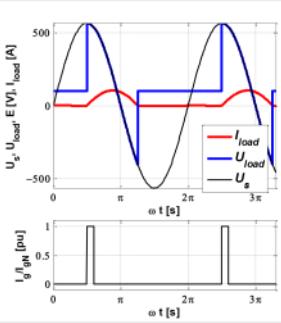
11

Wrocław University of Science and Technology

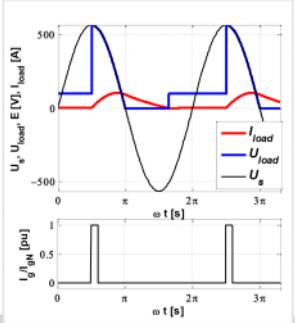
Prostowniki sterowane

Wpływ diody zerowej

Bez diody zerowej:



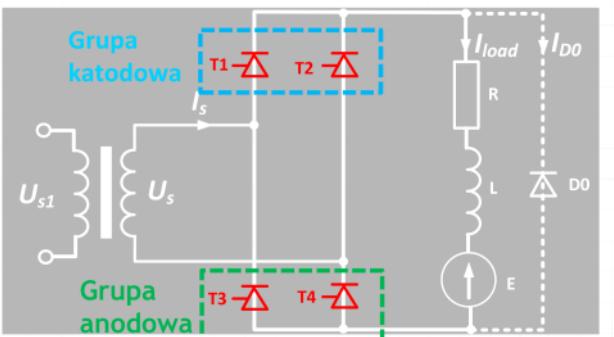
Z diodą zerową



12

Wrocław University of Science and Technology

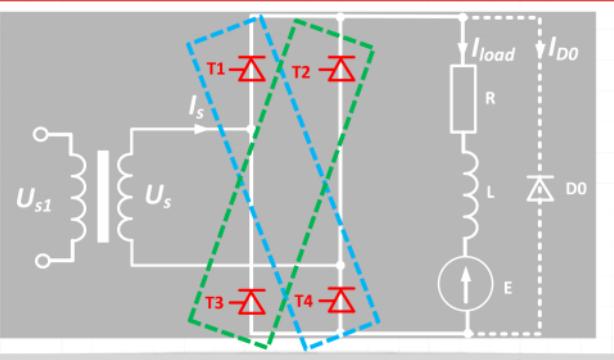
Prostowniki sterowane



13

Wroclaw University of Science and Technology

Prostowniki sterowane



14

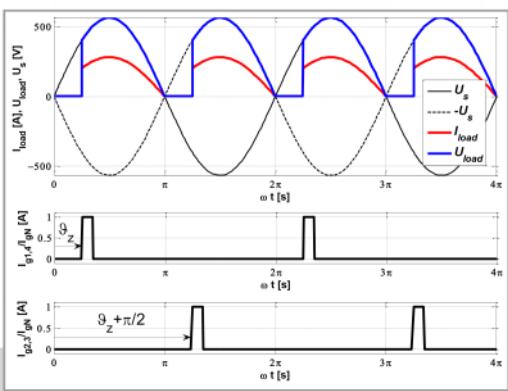
Wroclaw University of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany 1-fazowy, 2-pulsowy

Charakterystyczne kąty:

- ϑ_z – kąt wyzwolenia ($\vartheta_z = 45^\circ = \pi/4$),
- $\vartheta_w = \pi$
- $\vartheta_m = \pi/2$
- $\lambda = \pi - \vartheta_z$



15

* • KOLOS: pamięć o "wyszczekach" przy typostowach

• Przewodzące pary: [ty, wys, lony]

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany 1-fazowy, 2-pulsowy

Parametry:

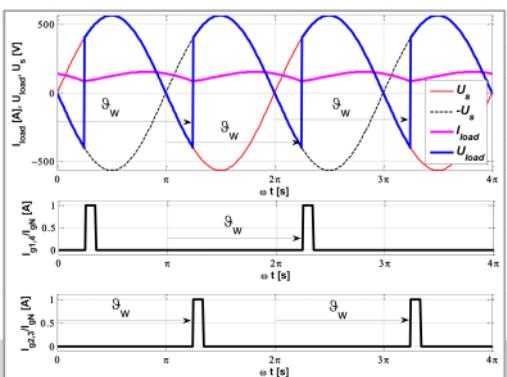
$$R = 2 \Omega$$

$$L = 20 \text{ mH}$$

Kąty:

- ϑ_z – kąt wyzwolenia ($\vartheta_z = 45^\circ = \pi/4$),
- $\vartheta_w = \vartheta_z + \pi$
- $\vartheta_m > \pi/2$
- $\lambda = \vartheta_w - \vartheta_z = \pi$

16



Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany 1-fazowy, 2-pulsowy

Parametry:

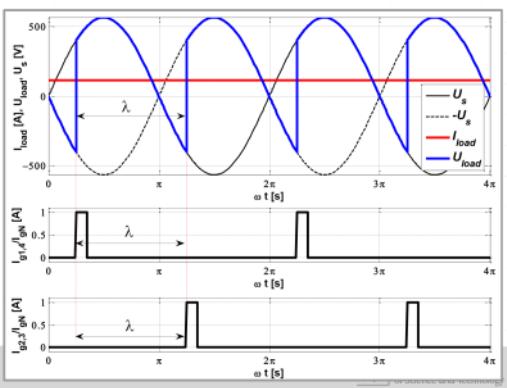
$$R = 2 \Omega$$

$$L \rightarrow \infty$$

Kąty:

- ϑ_z – kąt wyzwolenia ($\vartheta_z = 45^\circ = \pi/4$),
- $\vartheta_w = \vartheta_z + \pi$
- $\vartheta_m = \pi/2$
- $\lambda = \pi$

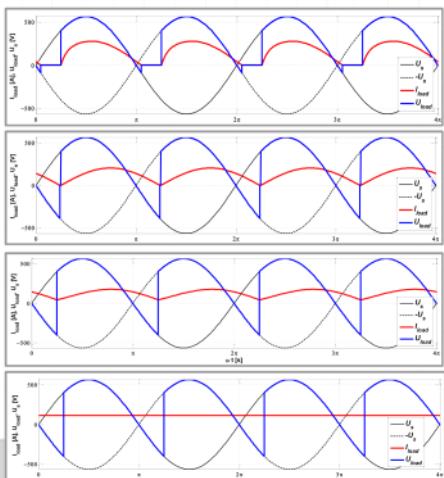
17



Prostowniki sterowane

Prąd nieciągły

$$L = L_I$$



Prąd graniczny

$$L = L_2 > L_I$$

Prąd ciągły

$$L = L_3 > L_2$$

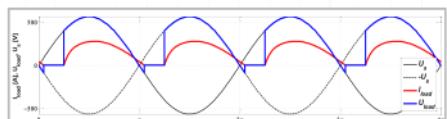
Prąd stały

$$L \rightarrow \infty$$

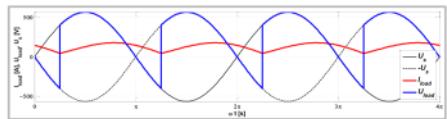
18

Prostowniki sterowane

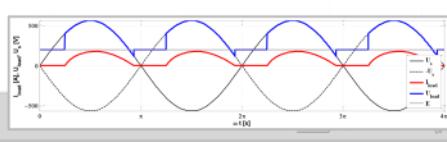
Prąd nieciągły
 $L = L_i$



Prąd ciągły
 $L = L_3, E = 0 \text{ V}$



Prąd nieciągły
 $L = L_3, E = 200 \text{ V}$



19

Prostowniki sterowane

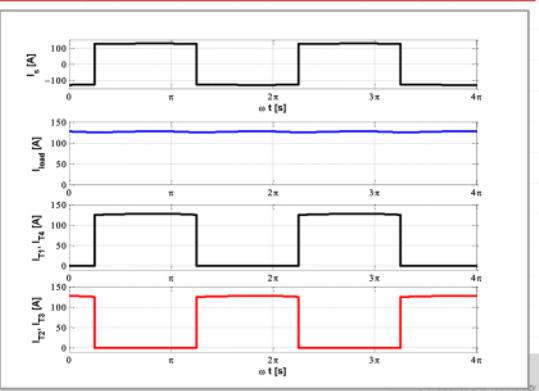
Przebiegi prądów

Parametry:

$$R = 2 \Omega$$

$$L \rightarrow \infty$$

20



Prostowniki sterowane

Równania napięciowe dla obciążenia R, 1-fazowy, 2-pulsowy

Napięcie obciążenia w czasie:

$$u_{load}(t) = \begin{cases} U_m \sin \omega t & \vartheta_z < \omega t < \pi \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

Wartość średnia napięcia wyjściowego:

$$\begin{aligned} U_{load} &= 2 \frac{1}{2\pi} \int_{\vartheta_z}^{\pi} U_m \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{\pi} (\cos(\pi) - \cos(\vartheta_z)) \\ &= -\frac{U_m}{\pi} (-1 - \cos(\vartheta_z)) = \boxed{\frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \vartheta_z)} \end{aligned}$$

21

Prostowniki sterowane

Równania napięciowe dla obciążenia RL, L->∞, 1-fazowy, 2-pulsowy

Napięcie obciążenia w czasie:

$$u_{load}(t) = \begin{cases} U_m \sin \omega t & \vartheta_z < \omega t < \vartheta_z + \pi \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

Wartość średnia napięcia wyjściowego:

$$\begin{aligned} U_{load} &= 2 \frac{1}{2\pi} \int_{\vartheta_z}^{\vartheta_w = \vartheta_z + \pi} U_m \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{\pi} (\cos(\vartheta_z + \pi) - \cos(\vartheta_z)) \\ &= -\frac{U_m}{\pi} (-\cos(\vartheta_z) - \cos(\vartheta_z)) = \frac{2U_m}{\pi} \cos \vartheta_z \\ U_{load} &= U_{d0} \cos \vartheta_z \end{aligned}$$

22

Prostowniki sterowane

Równania napięciowe dla obciążenia RLE, 1-fazowy, 2-pulsowy

Napięcie obciążenia w czasie:

$$u_{load}(t) = \begin{cases} U_m \sin \omega t & \vartheta_z < \omega t < \vartheta_w \\ E & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

Wartość średnia napięcia wyjściowego:

$$U_{load} = \frac{2U_m}{\pi} [(\cos \vartheta_z - \cos \vartheta_w) - \varepsilon (\vartheta_w - \vartheta_z)] + E, \quad \varepsilon = \frac{E}{U_m}$$

Spadek napięcia na rezystancji:

$$U_R = U_{load} - E = RI_{load}$$

23

Prostowniki sterowane

Równania prądowe

Prąd obciążenia:

$$i_{load}(t) = \frac{U_m}{R} \left[[\cos \varphi \sin(\omega t - \varphi) - \varepsilon] + [\varepsilon - \cos \varphi \sin(\alpha_z - \varphi)] \exp \left[-\frac{R}{\omega L} (\omega t - \alpha_z) \right] \right]$$

$$\text{gdzie: } \varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

• pr

• prak. stały → indukcyjność nie wpływa na
wartość średnia

Prąd DC – uproszczenie (połowa przebiegu sinusoidalnego):

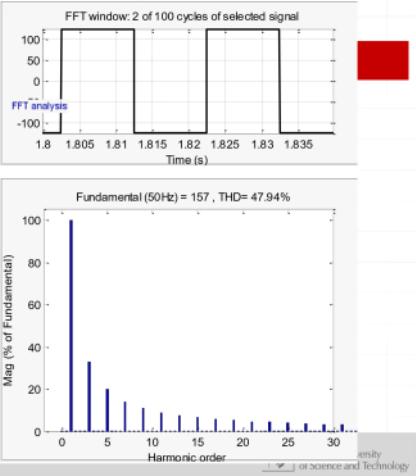
$$i_{load}(t) = I_m \sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \omega(t - t_z) \right); \quad \omega t \in (\vartheta_z, \vartheta_w) \quad \text{gdzie: } I_m = \frac{\pi^2}{\lambda} I_{load}$$

$$\text{Prąd DC – wartość średnia: } I_{load} = \frac{U_{load} - E}{R}$$

24

Prostowniki sterowi

Analiza widmowa FFT

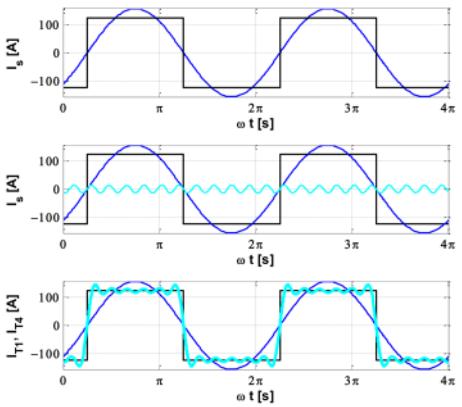


25

- przebieg niekorzystny z punktu widzenia jakości energii
- brak parzystych harmonicznych -> wartość średnia to 0
- okienka są z Simulink, można łatwo przeprowadzić analizę FFT w toolboxie,

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany

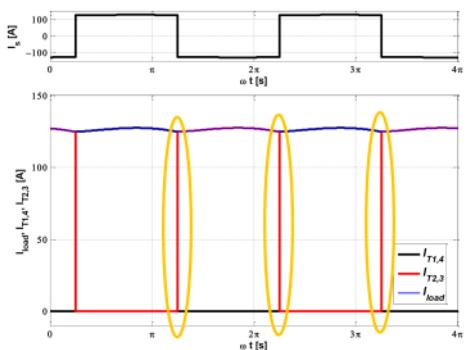


26

- na niebiesko: któraś z harmonicznych

Prostowniki sterowane

Zjawisko komutacji – przebiegi idealne



Parametry:

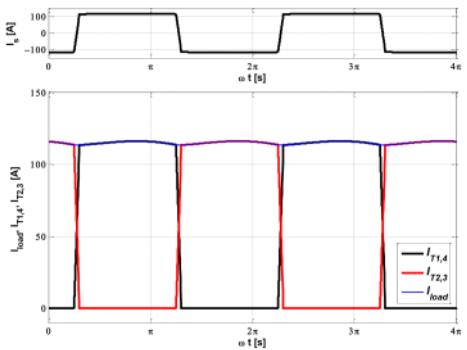
 $R = 2 \Omega$ $L \rightarrow \infty$

27

- komutacja – ważne zjawisko
- prąd na wyjściu jest ciągły
- następują skoki (przejścia, przełączenia) pomiędzy układami
- gdy jeden prąd danej pary tyristorów rośnie, drugiej maleje
- nic się nie dzieje nagle, komutacja ma skończony czas

Prostowniki sterowane

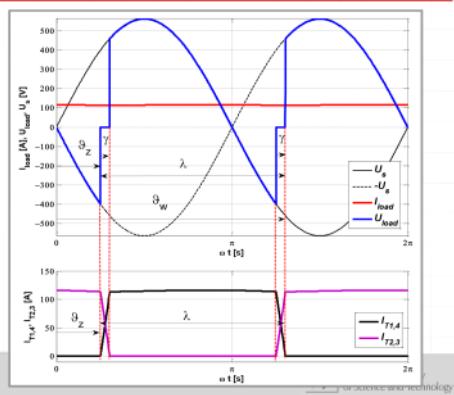
Zjawisko komutacji – przebiegi rzeczywiste



28

Prostowniki sterowane

Zjawisko komutacji – przebiegi rzeczywiste



29

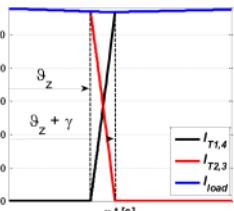
- można wyróżnić kąt komutacji -> czas narostu i opadania komutacji w odpowiednich tyristorach
- występuje spadek napięcia na komutacji, jest to zjawisko negatywne

Prostowniki sterowane

Prądy i napięcia podczas komutacji

$$\begin{aligned} i_{T1,4} &= I_{load} - i_k \\ i_{T2,3} &= 0 + i_k \\ u_k &= \sqrt{2}U \sin(\omega t + \vartheta_z) = L_k \frac{di_k}{dt} \end{aligned}$$

↓



- "większy zoom" -> można rozpisać równania tego, co się dzieje podczas komutacji
- prąd w pierwszej parze tyrystrorów rośnie, prąd w drugiej parze tyrystrorów maleje
- napięcie komutacji: $L \frac{di}{dt}$

30

Prostowniki sterowane

Prądy i napięcia podczas komutacji

$$i_{T1,4} = I_{load} - i_k$$

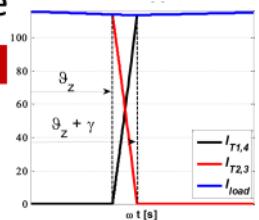
$$i_{T2,3} = 0 + i_k$$

$$u_k = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \vartheta_z) = L_k \frac{di_k}{dt}$$

↓

$$i_k = \frac{1}{L_k} \int_{\vartheta_z}^{\vartheta_z + \omega t} u_k d\omega t = \frac{1}{L_k} \int_{\vartheta_z}^{\vartheta_z + \omega t} \sqrt{2}U \sin(\omega t + \vartheta_z) d\omega t = -\frac{\sqrt{2}U}{\omega L_k} [\cos(\vartheta_z + \omega t) - \cos \vartheta_z]$$

↓



- obliczanie kąta: całkowanie w odpowiednich granicach

31

Prostowniki sterowane

Prądy i napięcia podczas komutacji

$$i_{T1,4} = I_{load} - i_k$$

$$i_{T2,3} = 0 + i_k$$

$$u_k = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \vartheta_z) = L_k \frac{di_k}{dt}$$

↓

$$i_k = \frac{1}{L_k} \int_{\vartheta_z}^{\vartheta_z + \omega t} u_k d\omega t = \frac{1}{L_k} \int_{\vartheta_z}^{\vartheta_z + \omega t} \sqrt{2}U \sin(\omega t + \vartheta_z) d\omega t = -\frac{\sqrt{2}U}{\omega L_k} [\cos(\vartheta_z + \omega t) - \cos \vartheta_z]$$

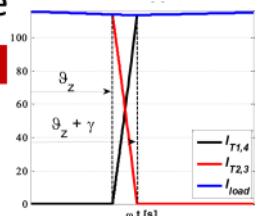
↓

$$i_{T1,4} = I_{load} - \frac{\sqrt{2}U}{X_k} [\cos \vartheta_z - \cos(\vartheta_z + \omega t)]$$

$$i_{T2,3} = \frac{\sqrt{2}U}{X_k} [\cos \vartheta_z - \cos(\vartheta_z + \omega t)]$$

$$\Rightarrow X_k = \omega L_k$$

- można rozpisać równania na wartość prądów w czasie

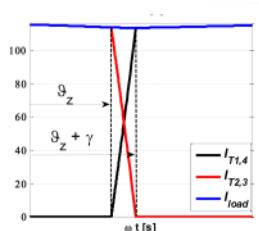


Prostowniki sterowane

Prądy i napięcia podczas komutacji

$$\text{dla } \omega t = \gamma, i_k = 0, i_{T1,4} = I_{load}$$

$$I_{T1,4} = I_{load} = \frac{\sqrt{2}U}{X_k} [\cos \vartheta_z - \cos(\vartheta_z + \gamma)]$$



33

Prostowniki sterowane

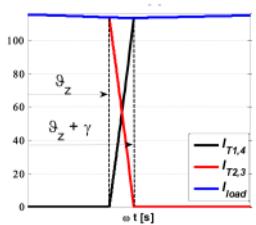
Prądy i napięcia podczas komutacji

dla $\omega t = \gamma$, $i_k = 0$, $i_{T1,4} = I_{load}$

$$I_{T1,4} = I_{load} = \frac{\sqrt{2}U}{X_k} [\cos \vartheta_z - \cos(\vartheta_z + \gamma)]$$

Równanie komutacji:

$$\frac{I_{load} X_k}{\sqrt{2}U} = [\cos \vartheta_z - \cos(\vartheta_z + \gamma)]$$



- równanie komutacji pozwala na obliczanie spadków napięcia podczas komutacji

34

Prostowniki sterowane

Prądy i napięcia podczas komutacji

dla $\omega t = \gamma$, $i_k = 0$, $i_{T1,4} = I_{load}$

$$I_{T1,4} = I_{load} = \frac{\sqrt{2}U}{X_k} [\cos \vartheta_z - \cos(\vartheta_z + \gamma)]$$

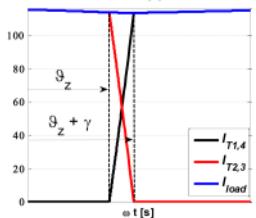
Równanie komutacji:

$$\frac{I_{load} X_k}{\sqrt{2}U} = [\cos \vartheta_z - \cos(\vartheta_z + \gamma)]$$

Kąt komutacji:

$$\gamma = \arccos \left(\cos \vartheta_z - \frac{I_{load} X_k}{\sqrt{2}U} \right) - \vartheta_z$$

$$\gamma_0 = \arccos \left(1 - \frac{I_{load} X_k}{\sqrt{2}U} \right), \quad \vartheta_z = 0$$



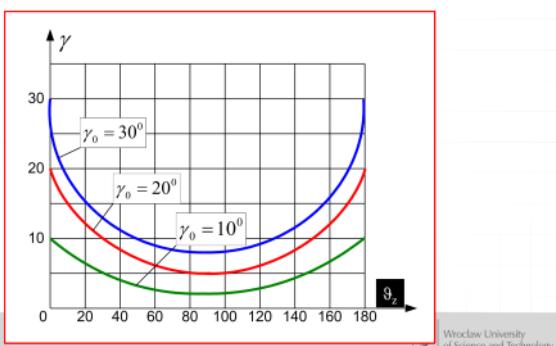
- kąt komutacji można obliczyć z równania komutacji
- można policzyć kąt komutacji dla kąta równego 0

35

Prostowniki sterowane

Charakterystyki kąta komutacji

$$\gamma = \arccos (\cos \vartheta_z + \cos \gamma_0 - 1) - \vartheta_z$$



- w zależności od kąta zerowego, 30, 20, 10 → mamy takie funkcje
- minimum dla ~80 stopni, maks dla 0 i 180
-

36

Prostowniki sterowane

Komutacja – spadek napięcia

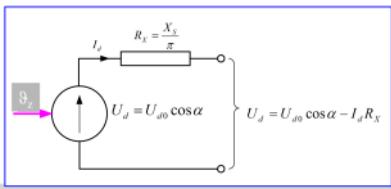
Komutacyjny spadek napięcia:

$$\Delta u_k = \frac{1}{\pi} \int_{\vartheta_2}^{\vartheta_2 + \gamma} \sqrt{2}U \sin(\omega t + \vartheta_z) = \frac{\sqrt{2}U}{\pi} [\cos \vartheta_z - \cos(\vartheta_z - \gamma)]$$

$$\Delta u_k = \frac{\sqrt{2}U}{\pi} \frac{I_d X_s}{\sqrt{2}U} = I_d \frac{X_s}{\pi}$$

Napięcie DC:

$$U_{load} = U_{d0} \cos \vartheta_z - \Delta u_k \\ = U_{d0} \cos \vartheta_z - I_d \frac{X_s}{\pi}$$



Wroclaw University
of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Komutacja – spadek napięcia

Komutacyjny spadek napięcia

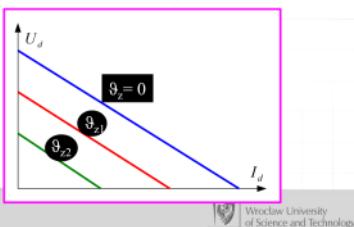
$$\Delta u_k = \frac{1}{\pi} \int_{\vartheta_2}^{\vartheta_2 + \gamma} \sqrt{2}U \sin(\omega t + \vartheta_z) = \frac{\sqrt{2}U}{\pi} [\cos \vartheta_z - \cos(\vartheta_z - \gamma)]$$

$$\Delta u_k = \frac{\sqrt{2}U}{\pi} \frac{I_d X_s}{\sqrt{2}U} = I_d \frac{X_s}{\pi}$$

Napięcie DC:

$$U_{load} = U_{d0} \cos \vartheta_z - \Delta u_k \\ = U_{d0} \cos \vartheta_z - I_d \frac{X_s}{\pi}$$

Charakterystyki wyjściowe:



Wroclaw University
of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Komutacja – spadek napięcia

Napięcie DC:

$$U_{load} = U_{d0} \cos \vartheta_z - \Delta u_k \\ = U_{d0} \cos \vartheta_z - I_d \frac{X_s}{\pi}$$

gdzie:

$$U_{d0} = \frac{q}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{q}$$

q – liczba pulsów

U_m – wartość maksymalna napięcia zasilającego

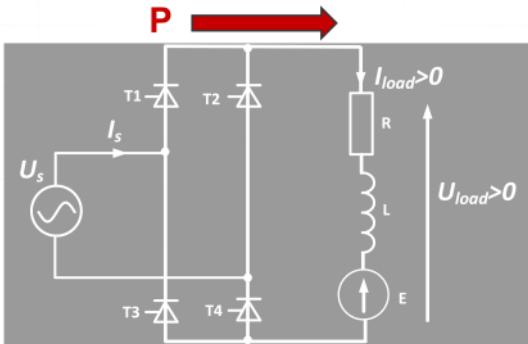
- po przeliczeniach różnica napięcia przyjmuje uproszczony wzór
- finalnie, napięcie na wyjściu będzie równe idealnej charakterystyce
- im większy prąd i reaktancja, tym większy spadek napięcia ze względu na reaktancję
- może pojawić się pytanie: co to jest komutacja i co się z nią wiąże w przypadku prostowników?

Prostowniki sterowane

Praca prostownikowa

$$I_{load} = \frac{U_{load} - E}{R} \cap I_{load} \geq 0$$

$$\vartheta_z < \frac{\pi}{2}$$



40

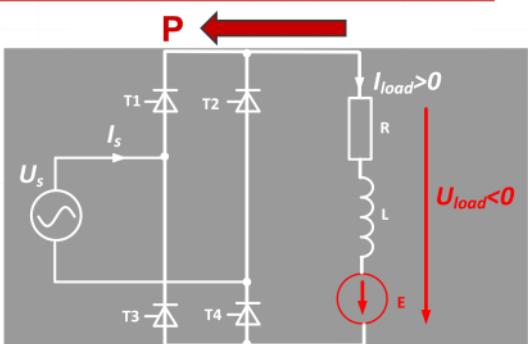
Wroclaw University of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Praca falownikowa

$$I_{load} = \frac{-U_{load} + E}{R} \cap I_{load} \geq 0$$

$$\vartheta_z > \frac{\pi}{2}$$

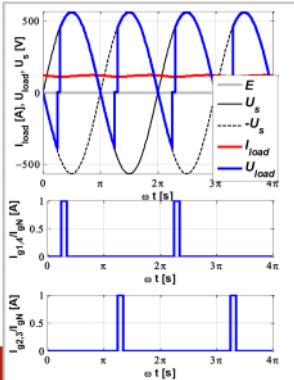


41

Wroclaw University of Science and Technology

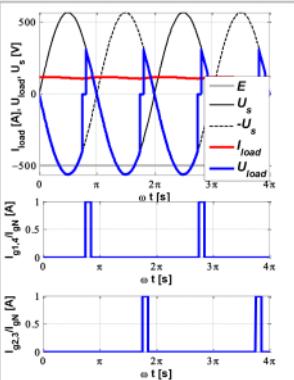
Prostowniki sterowane

E = 0 V, $\vartheta_z = 45^\circ$



42

E = -500 V, $\vartheta_z = 135^\circ$



- zastosowanie diody zerowej eliminuje coś, co się nazywa pracą prostownika
- normale, moc jest pobierana z sieci i przechodzi od źródła prądu przeniesionego do źródła prądu stałego
- analizując to ze względu na stronę prądu stałego, prąd ten zawsze jest dodatni, nie ma możliwości, żeby popchnąć w drugą stronę
- jeśli prąd jest dodatni i napięcie na wyjściu jest dodatnie, to moc jest dodatnia -> czyli jest pobierana z sieci

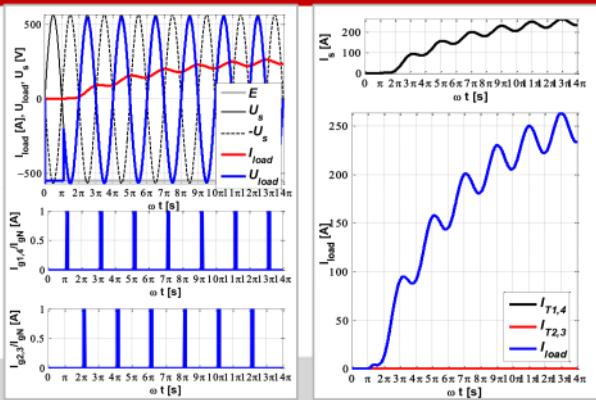
- jeśli uda nam się zapewnić taką sytuację, że napięcie na wyjściu jest ujemne, a pomimo tego płynie prąd (musi być dodatni), czyli np. SEM skierowana w drugą stronę, wymusza to przepływ prądu w drugą stronę: iloczyn UI jest ujemny, czyli energia jest przekazywana do sieci
- tryb pracy falownikowej** - może być potrzebny, jeśli podłączymy np. silnik
 - jeśli mamy windę bez przeciwwagi, w momencie ruchu w dół, silnik pracuje w trybie pracy generatorowej -> zwracamy energię do sieci (do drugiej windy)
- warto wspomnieć o tym, że w przypadku diod nie ma takiej możliwości, żeby zwrócić energię do sieci -> prostownik + falownik (przemiennik częstotliwości), diody nie pozwalają na oddawanie energii

- prąd ma podobną wartość w obu przypadkach
- kąt sterujące opóźnione względem siebie -> napięcie po lewej jest głównie dodatnie, po prawej -> głównie dodatnie
- średnia wartość U na obciążeniu w drugim przypadku jest ujemna -> przekazujemy energię do sieci
- praca falownikowa: zawsze, gdy kąt jest większy niż 90 stopni

Prostowniki sterowane

$E = -500 \text{ V}$, $\theta_z = 200^\circ$

Przewróć falownika



43

- przewróć falownika - jeśli przekroczymy pewien maksymalny kąt (niejednoznacznie zdefiniowany, zależy od param. falownika), możemy doprowadzić do przewrotu falownika,
 - jeśli mamy silne dodatkowe i miękkie napięcie ujemne, U się kompensować
 - jeśli przekroczymy ten kąt i nie uda się przełączyć jednej pary tyristorów na drugą, napięcie przybiera postać sinusoidalną - jeśli wcześniej było ujemne, teraz jest ujemne i dodatnie: prąd zaczyna rosnąć
 - przewróć falownika – to właśnie to zwiększenie się prądu
 - o projektowaniu należy pilnować, żeby tego kąta nie przekraczać

Prostowniki sterowane

Klasifikacja

Prostowniki 3-fazowe mogą zostać podzielone na:

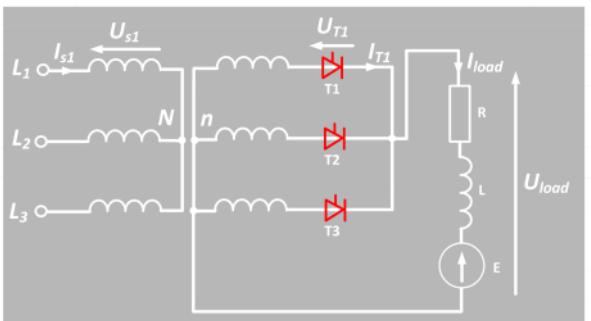
- Prostownik 3-pulsowy sterowany
- Prostownik 6-pulsowy sterowany:
 - Prostownik w układzie gwiazdowym
 - Prostownik w układzie mostkowym:
 - W pełni sterowany
 - Pół-sterowany
- Prostownik 12-pulsowy

44

Wroclaw University of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany, 3-pulsowy

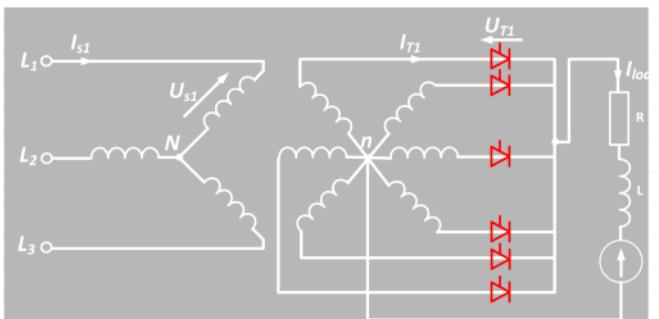


45

Wroclaw University of Science and Technology

Prostowniki sterowane

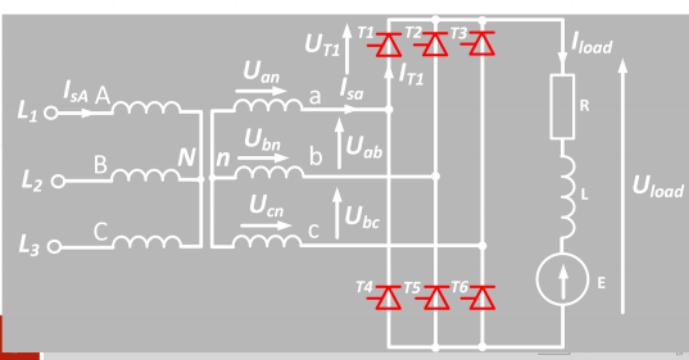
Prostownik sterowany 6-pulsowy w układzie gwiazdowym



- bardzo rzadko spotyka się takie rozwiązanie, musi być transformator

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany, 6 pulsowy w układzie mostkowym, schemat blokowy



- najczęściej spotykany układ, transformator może być, ale nie musi

Prostowniki

Prostownik 6-pulsowy niesterowany, powtórzenie

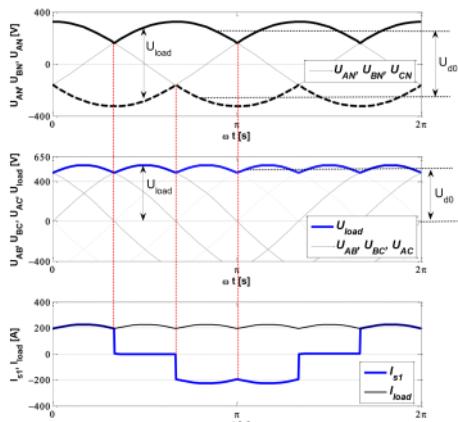
Maximum value of DC voltage:

$$U_{load,max} = \sqrt{2} \sqrt{3} U_{AN}$$

Mean value of DC voltage:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{AN}$$

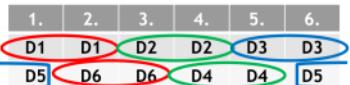
$$= 2.34 U_{AN}$$



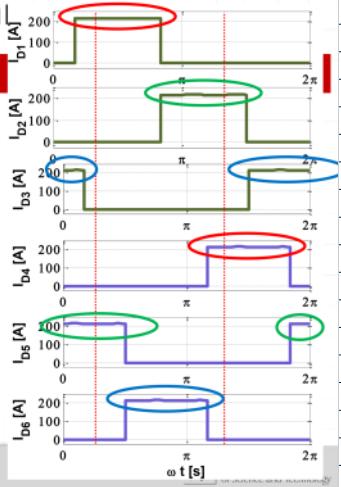
- przebiegi dla układu diodowego
- punkt naturalnej komutacji: czerwona kreska pionowa
 - to jest punkt, w którym mamy komutację naturalną, niewymuszoną działaniem w celu załączenia tyristora
 - przecinają się dwa napięcia, jedno jest większe, napięcie na wyjściu przyjmuje jego wartość

Prostowniki sterowani

Prostownik niesterowany, sekwencja diod



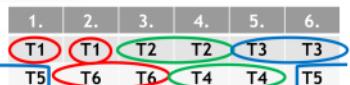
49



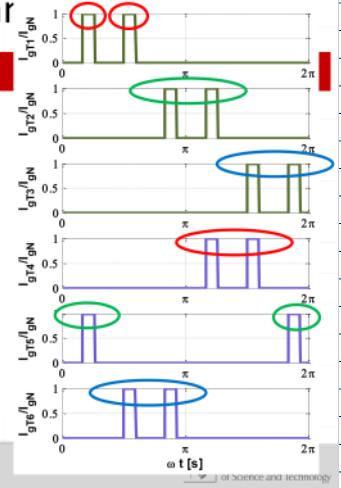
- zawsze przewodzą dwie diody
 - D1, D6
- tam, gdzie napięcie jest dodatnie dla danej fazy, przewodzi dioda 1, gdzie jest ujemne - dioda 4

Prostowniki sterowani

Prostownik sterowany, sekwencja załączzeń



50

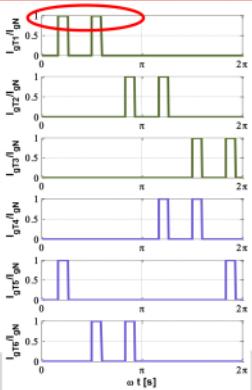


- tyristory sterujemy w identyczny sposób do diod sposób

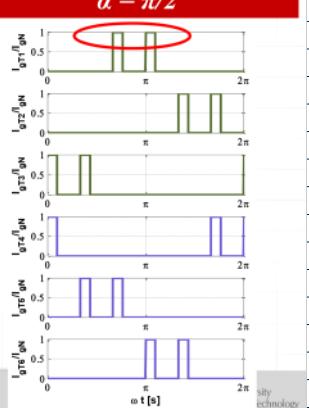
Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany, sekwencja załączzeń

$$\alpha = \pi/2$$



51

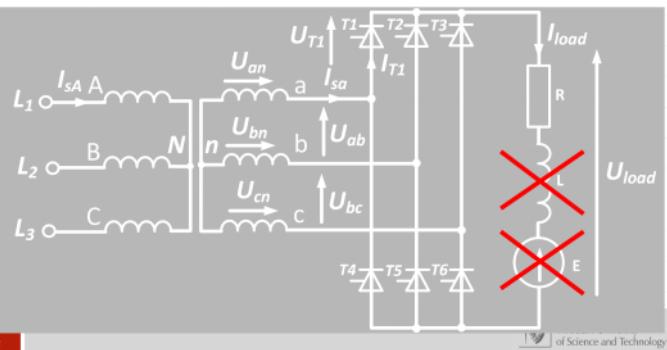


- przy 90 stopniach: przesunięta w czasie sekwencja
- musimy wiedzieć, jak odpowiednio sterować naszymi tyristorami: cyfrowo, analogowo?

•

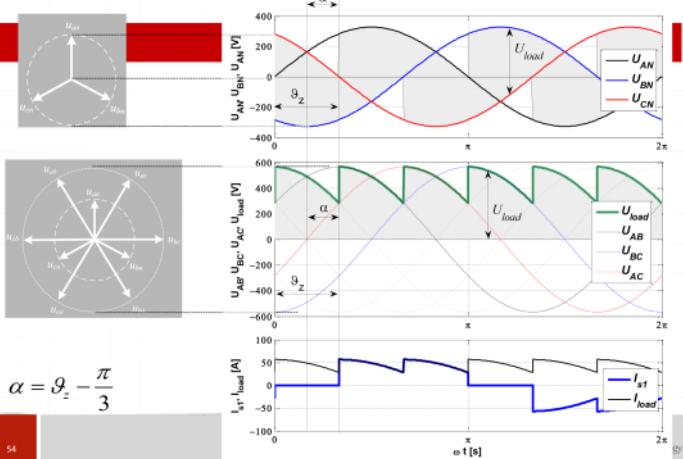
Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany, 6 pulsowy w układzie mostkowym, schemat blokowy



Prostowniki sterowane

Prąd ciągły



- mówimy o kącie licznym od punktu przecięcia napięć (pkt komutacji naturalnej)
- tyristor nie jest złączony, więc napięcie przyjmuje wartość napięcia poprzedniego
- dopiero wtedy, gdy złączymy tyristor (damy impuls sterujący), napięcie przyjmuje wartość napięcia kolejnego
- równanie na dole wiąże kąt liczony od 0 i kąt alfa ($\pi/3$) - to jest ważne dla układu 3-fazowego
- układ 2-pulsowy: kąty były sobie równe, nie było $\pi/3$

Prostowniki sterowane

Napięcia

Średnia wartość napięcia DC:

$$U_{load} = U_{d0} \cos \alpha$$

gdzie:

$$U_{d0} = \frac{q}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{q}$$

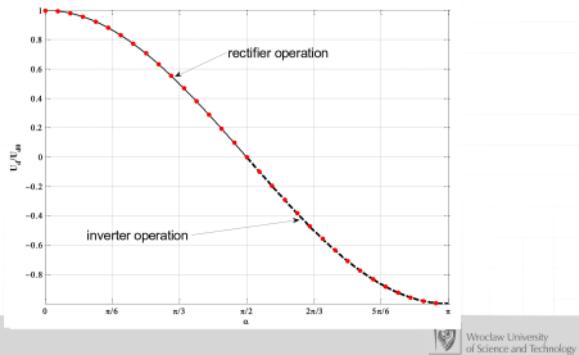
q – liczba pulsów

U_m – wartość maksymalna napięcia zasilającego

- $\cos \alpha$, nie $\sin \alpha$
- jakbyśmy chcieli użyć $\sin \alpha$, musielibyśmy wstawiać różne wartości

Prostowniki sterowane

Charakterystyki sterowania (wartość średnia napięcia) $U_{load} = U_{d0} \cos \alpha$



- nas interesuje wartość od 1 do -1
- charakterystyka nielinowa, malejąca - sygnał nie rośnie wraz ze wzrostem sygnału wejściowego
- inverter -> falownik -> oddajemy energię do sieci

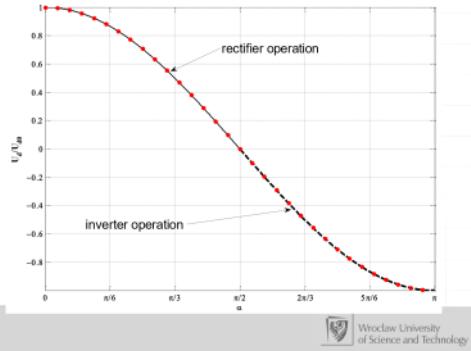
56

Prostowniki sterowane

Charakterystyki sterowania (wartość średnia napięcia)

Charakterystyki sterowania zależą od:

- Kształt prądu (ciągły, nieciągły)
- Parametrów obciążenia – R, L
- Napięcia obciążenia – E
- Diody zerowej
- Spadków napięcia ze względu na: komutację, rezystancje elementów półprzewodnikowych, spadki napięć.

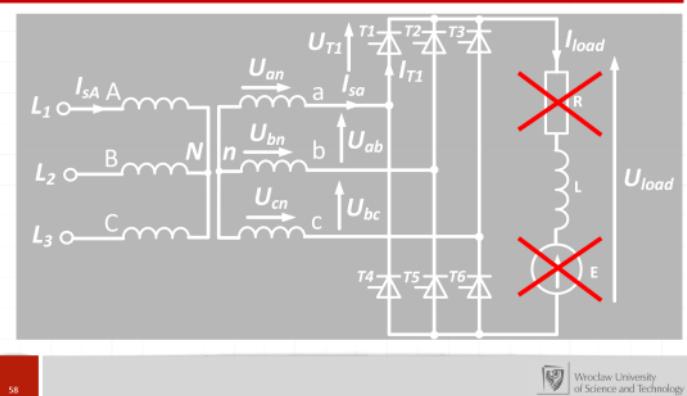


57

.

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany, 6 pulsowy w układzie mostkowym, schemat blokowy



- w przypadku L->infinity (brak rezystancji)

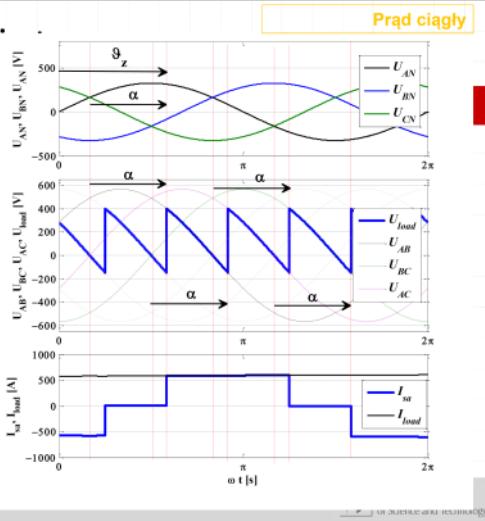
58

Prostownik*

Prostownik sterowany,

$$\alpha = \vartheta_z - \frac{\pi}{3}$$

$$(\alpha = 75^\circ)$$

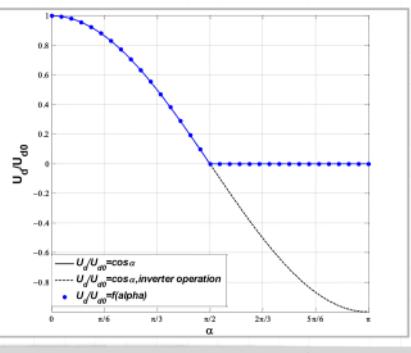


59

Prostowniki sterowane

Charakterystyka sterowania (wartość średnia napięcia)

$$\alpha = \vartheta_z - \frac{\pi}{3}$$



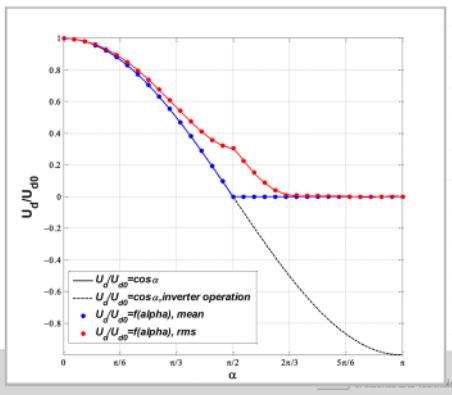
60

Wrocław University
of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Charakterystyki sterowania, wartość średnia i wartość RMS

$$\alpha = \vartheta_z - \frac{\pi}{3}$$



61

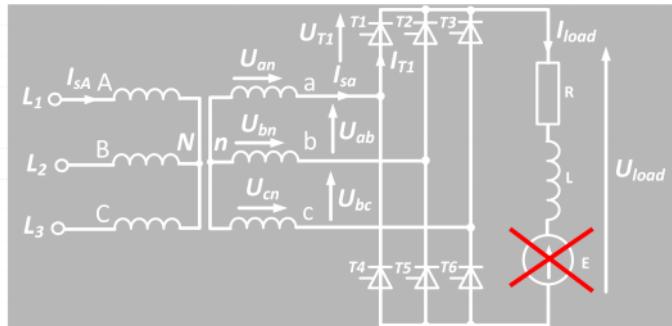
- przebieg, jeśli mamy L
 - napięcie prawie półokształtne
 - napięcie na wyjściu; kolejne wartości napięć międzyfazowych

- nie ma dodatkowego napięcia, więc nie ma możliwości przejścia na zakres pracy falownikowej

- pomimo tego, że napięcie średnie jest 0, dla kątów powyżej 90 stopni wartość skuteczna różni się od 0

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany, 6 pulsowy w układzie mostkowym, schemat blokowy



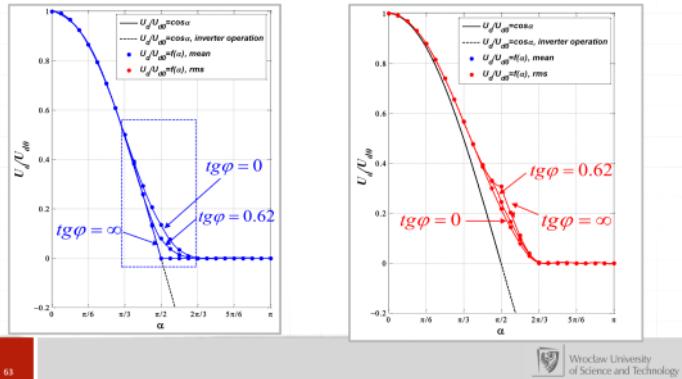
62

Wroclaw University
of Science and Technology

Prostowniki sterowane

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$$

Charakterystyki sterowania, zależność od parametrów obciążenia



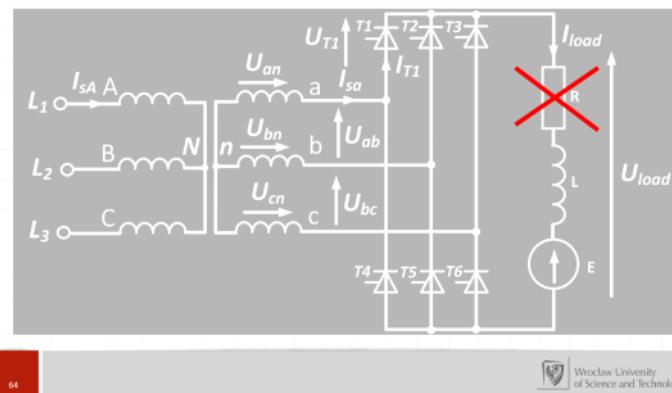
63

Wroclaw University
of Science and Technology

- charakterystyki w punkcie 90 stopni nieco się rozjeżdżają
- bez względu na to, jakie obciążenie podłączymy, charakterystyka będzie mniej więcej taka sama
- idealna charakterystyka dla czystej indukcyjności jest przy $\operatorname{tg} \varphi = \text{infty}$

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany, 6 pulsowy w układzie mostkowym, schemat blokowy, LE



64

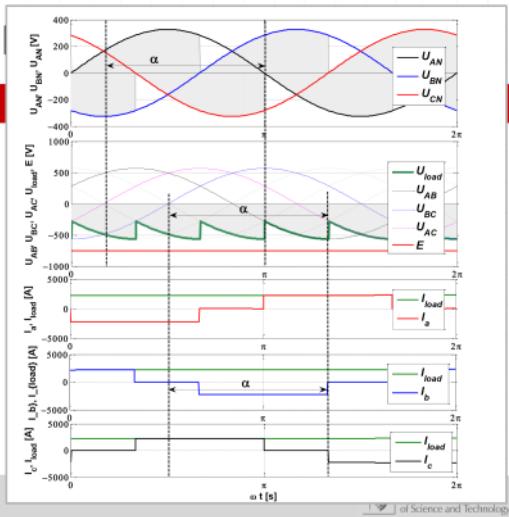
Wroclaw University
of Science and Technology

Prostowniki

Praca falownika

Warunki:

- $|E| > |U_d|$
- $\alpha > \pi/2$

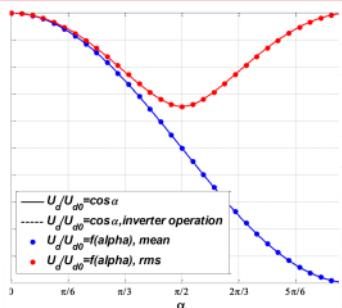


65

Prostowniki sterowane

Charakterystyki sterowania, wartość średnia vs wartość RMS, pełna praca falownika

($E = -750$ V)

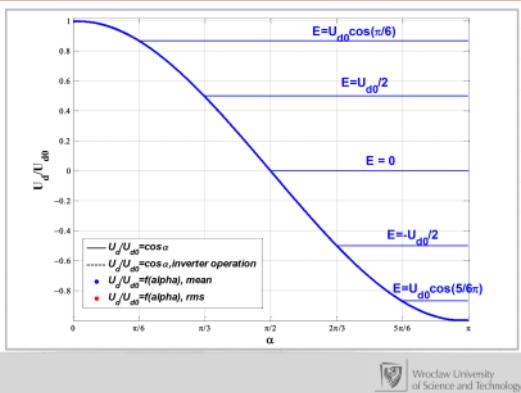


66

Wrocław University of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Charakterystyki sterowania, wpływ napięcia obciążenia (wartość średnia)



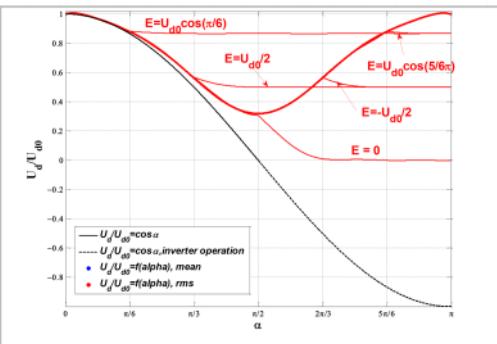
67

- charakterystyka idealna: duże napięcie, brak rezystancji, niebieska linia to $U_d/\cos \alpha$

- napięcie nie jest tak duże, aby przekraczać napięcie wyprowadzone
- mamy ograniczony zakres sterowania, nie możemy zejść do 0

Prostowniki sterowane

Charakterystyki sterowania, wpływ napięcia obciążenia (wartość RMS)

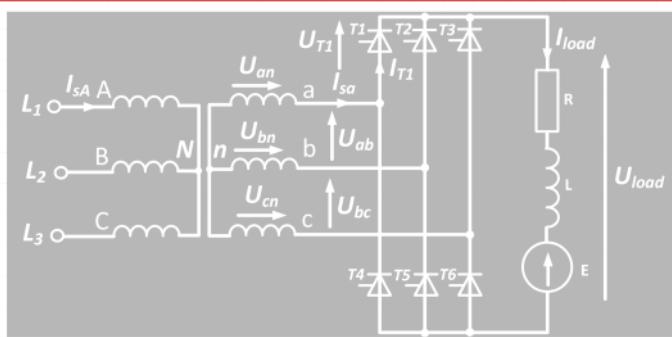


68

Wroclaw University
of Science and Technology

Prostowniki sterowane

Prostownik sterowany, 6 pulsowy w układzie mostkowym, schemat blokowy, RLE

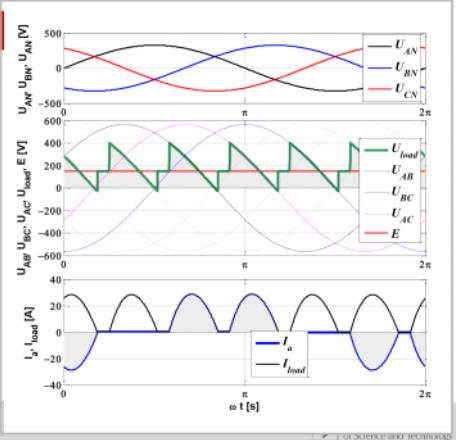


69

Wroclaw University
of Science and Technology

Prostowniki sterowane

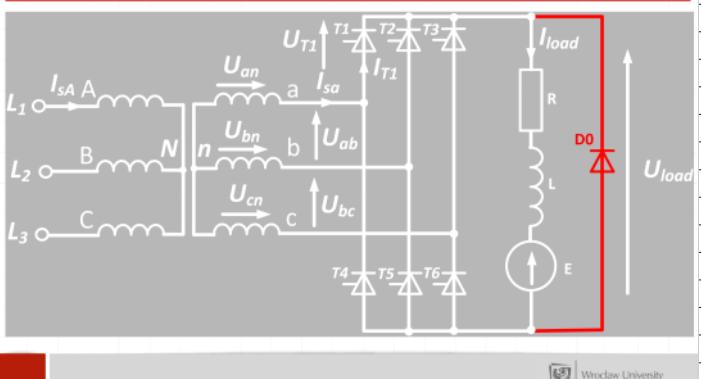
Obciążenie RLE



70

Prostowniki sterowane

Dioda zerowa



71

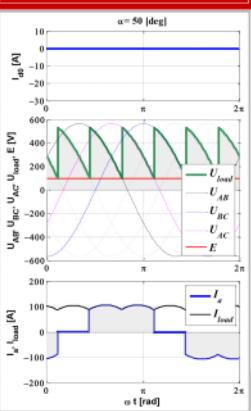
Wroclaw University of Science and Technology

Prostowniki sterowane

(prąd ciągły= brak efektu)

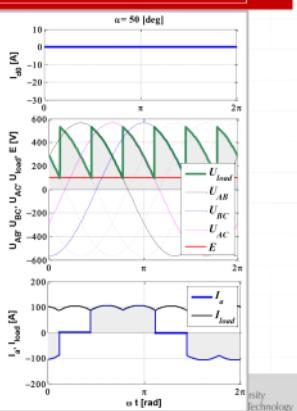
- nie ma różnicy między pracami bez D0 i z D0

bez D0



72

z D0

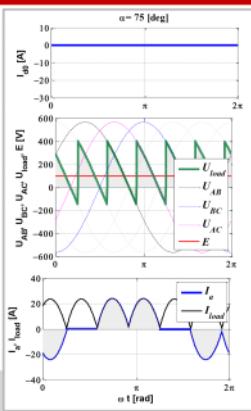


Prostowniki sterowane

(prąd nieciągły)

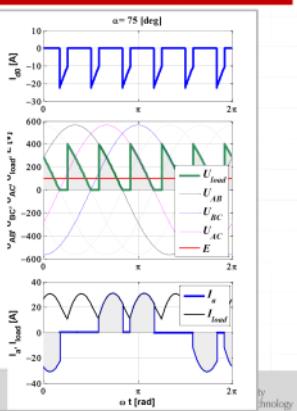
- w przypadku prądów nieciągich, dioda zerowa wpływa na działanie układu i charakterystyki
- nie ma wartości ujemnych napięcia

bez D0



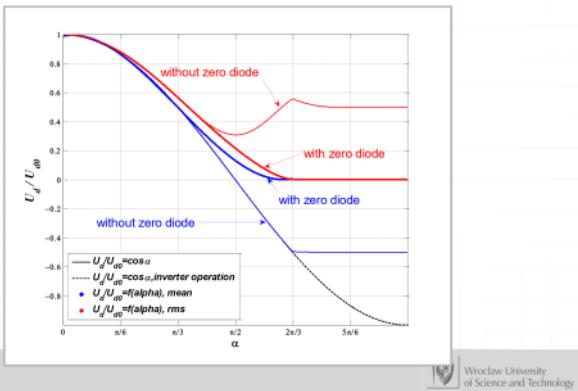
73

z D0



Prostowniki sterowane

Charakterystyki sterowania – wpływ diody zerowej

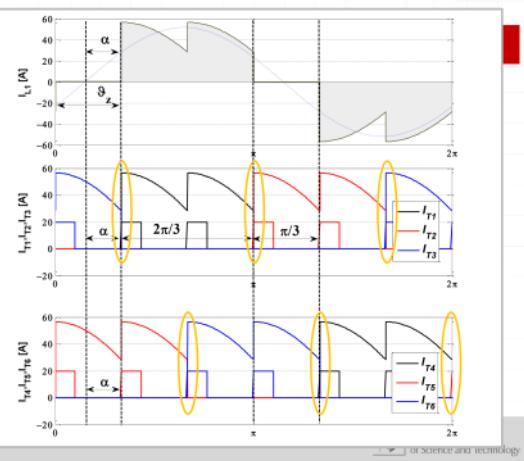


74

- nie ma możliwości uzyskania pracy falownikowej

Prostowniki sterowane

Komutacja

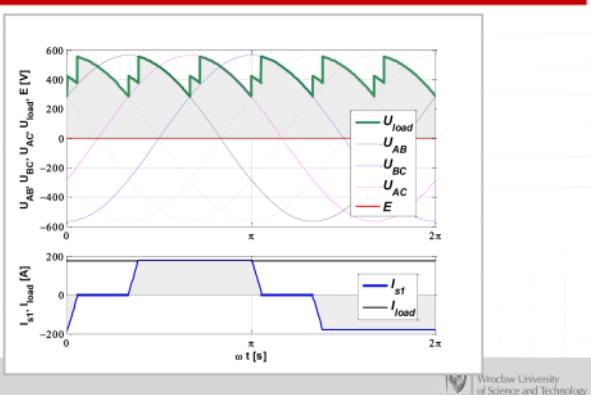


75

- komutacja ma miejsce

Prostowniki sterowane

Zjawisko komutacji

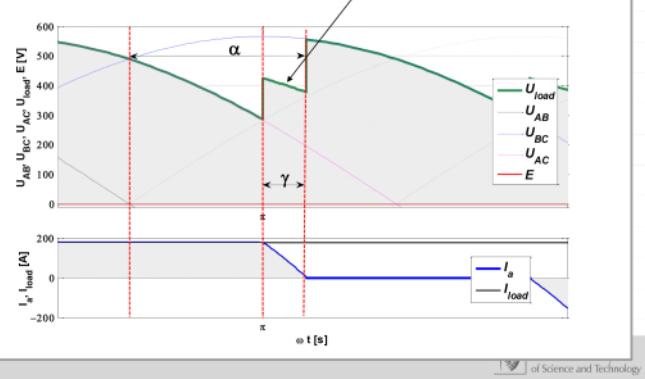


76

Prostowniki sterowane

$$u_k = \frac{1}{2} (u_{AB} - u_{BC})$$

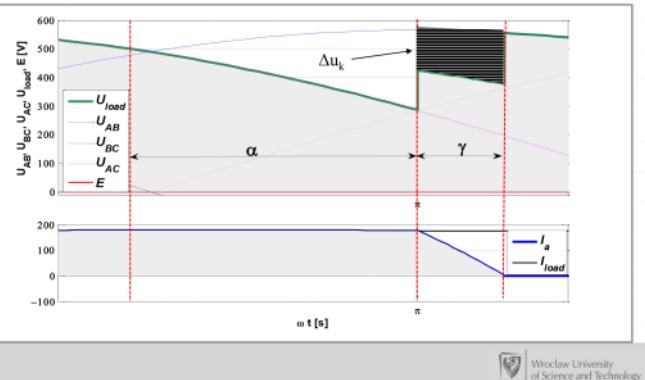
Zjawisko komutacji



- napięcie podczas komutacji nie jest zerowe, ale ciągłe jest niższe niż to, które by było
- mimo, że prąd na wyjściu jest ciągły,

Prostowniki sterowane

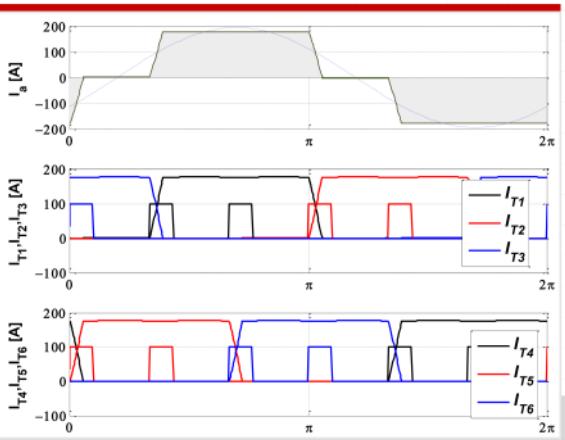
Zjawisko komutacji



- zakreskowana przestrzeń: spadek napięcia na komutacji

Prostowniki sterowane

Komutacja



- rzeczywiste przebiegi
- "przesadzony" czas, za długi
- jeden prąd rośnie, drugi zaczyna maleć, obniżone napięcie na wyjściu

Prostowniki sterowane

Zjawisko komutacji, spadek napięcia

Wartość średnia napięcia DC:

$$U_{load} = U_{d0} \cos \alpha - \Delta u_k$$

$$= U_{d0} \cos \alpha - \frac{q}{2} I_d \frac{X_s}{\pi} ?$$

gdzie:

$$U_{d0} = \frac{q}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{q}$$

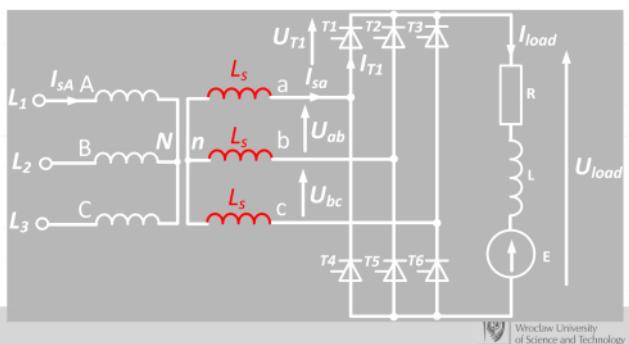
q – liczba pulsów

U_m – wartość maksymalna napięcia zasilającego

Prostowniki sterowane

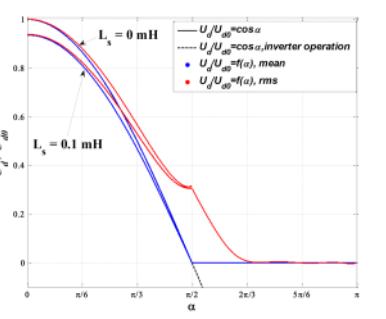
Zjawisko komutacji, reaktancja (indukcyjność) komutacyjna

$$X_s = \omega L_s$$



Prostowniki sterowane

Charakterystyki sterowania, wpływ komutacji



$$E = 0 \text{ V}$$

$$R = 0 \Omega$$

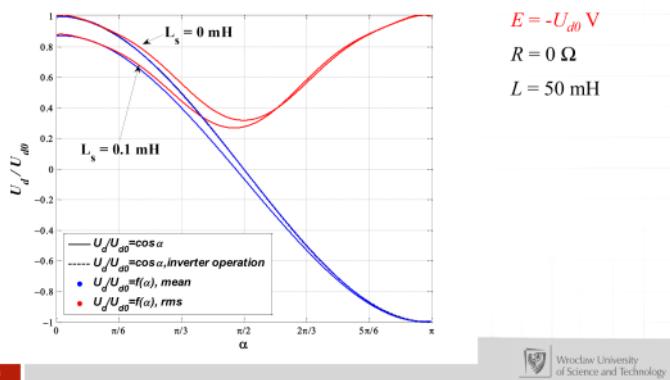
$$L = 50 \text{ mH}$$

- komutacja ma wpływ na napięcie dla większej wartości prądu

- równanie różni się tylko liczbą pulsów
- zmniejszenie liczby pulsów powoduje zwiększenie spadku napięcia
- znak zapytania:

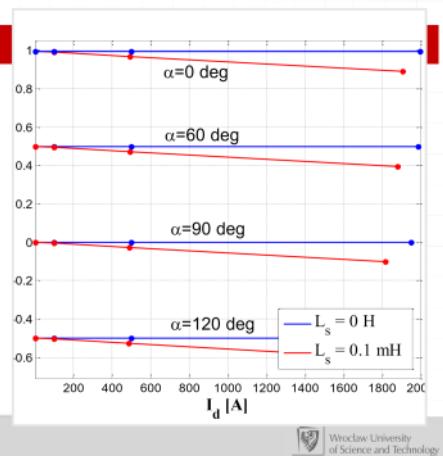
Prostowniki sterowane

Charakterystyki sterowania, wpływ komutacji



Prostowniki sterowane

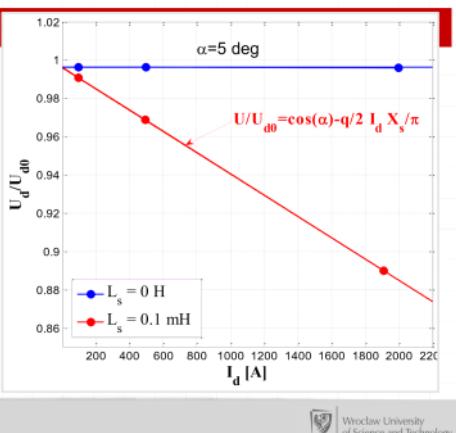
Charakterystyki obciążenia



- mówi, jak zmienia się napięcie w funkcji prądu pobieranego przez układ

Prostowniki sterowane

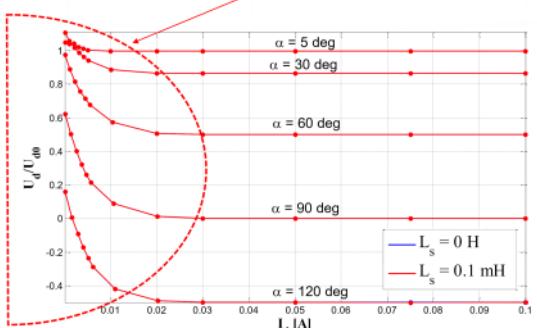
Charakterystyki obciążenia



Prostowniki sterowane

Wpływ prądów nieciągłych

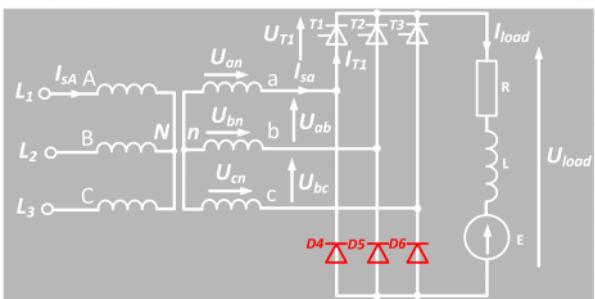
Zakres prądów nieciągłych



- charakterystyka prądu obciążenia

Prostowniki sterowane

Prostownik półsterowany



86 Wroclaw University of Science and Technology

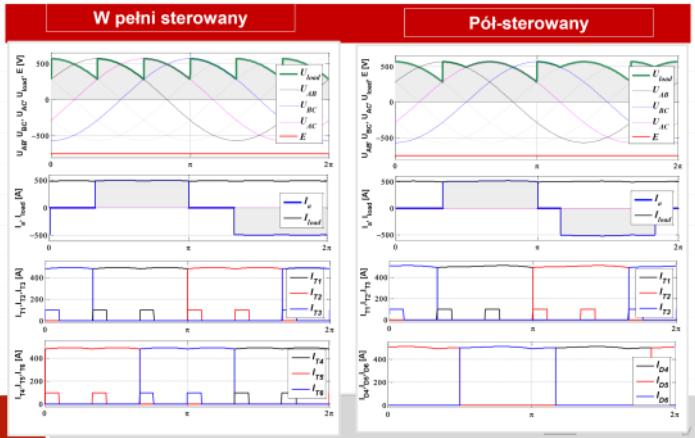
Prostowniki sterowane

W pełni sterowany

Pół-sterowany

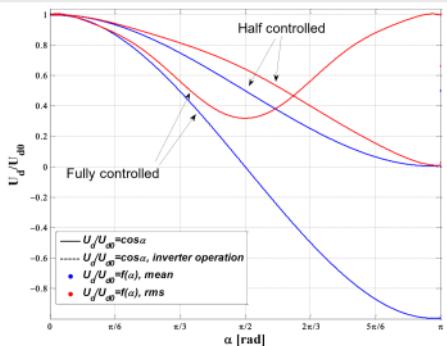
- prostownik półsterowany: diody i tyristory

- mamy na dolnym wykresie prady diod
- sterowanie grupą katodową zostaje takie, jak było
- napięcie, które było symetryczne, przestaje być symetryczne



Prostowniki sterowane

Charakterystyki sterowania, wpływ rodzaju prostownika



89

Dziękuję za uwagę!

90

Wykład 5

Energoelektronika – układy sterowania prostowników

dr inż. Grzegorz Tarchała



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Plan wykładu

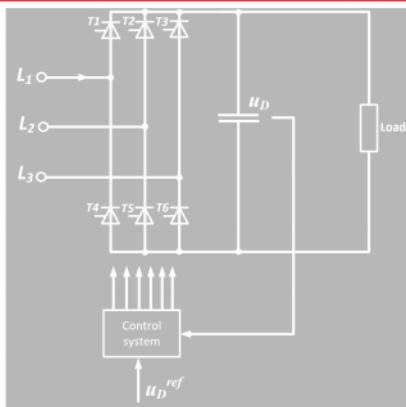
Układy sterowania prostowników:

- Sterowanie prostowników o sterowaniu fazowym:
 - Metoda sterowania adaptacyjnego
- Sterowanie prostowników PWM:
 - Metody sterowania skalarnego:
 - » Z wymuszeniem prądowym,
 - » Z wymuszeniem napięciowym,
 - Metody sterowania wektorowego

- Falownik - 6 tranzystorów, diody skierowane przeciwnie. Tutaj: struktura odwrotna
- dwie grupy sterowania: skalarne i wektorowe
- sieć jest traktowana jak wirtualna maszyna, wirtualny silnik indukcyjny
- metody skalarne: stany statyczne, metody wektorowe: stany dynamiczne (teoretycznie są lepsze)
- sterowanie fazowe: tyristory
 - uwzględnia kąt opóźnienia sterowania

Układy sterowania prostowników

Sterowanie prostownikiem tyrystorowym



- 6 tyristorów, kondensator na którym mierzymy napięcie, na podstawie kondensatora system musi wysterować tyristory
- teoretycznie ten układ sterowania będzie definiował jeden kąt, którego dekoderem będzie sterował odpowiednie tyristory

3

Układy sterowania prostowników

Sterowanie prędkością silnika DC zasilanego z prostownika tyrystorowego

- układ szeregowego sterowania silnikiem prądu stałego
- w idealnym przypadku: generacja napięcia bez opóźnienia
- nie zawsze jest idealnie, bez opóźnienia
- uproszczenie: brak wzbudzenia
- uproszczenie: prąd może płynąć w jednym kierunku, silnik może wytworzyć tylko dodatni moment, brak możliwości zahamowania
 - powinny być dwa prostowniki (prostownik nawrotny), trzeba uważać aby nie załączyć dwóch naraz
- regulator zmienny - adaptuje strukturę regulatora (regulator o zmiennej strukturze)

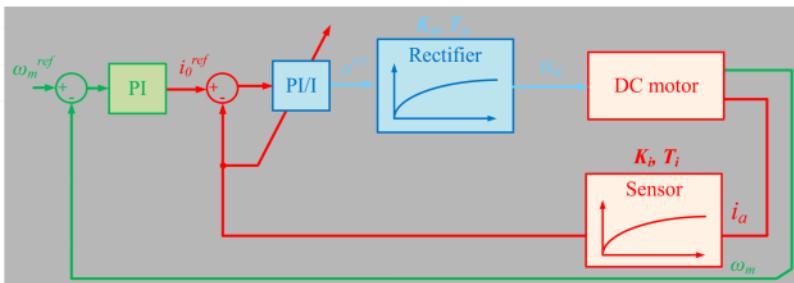
4

Układy sterowania prostowników

Sterowanie prędkością silnika DC zasilanego z prostownika tyrystorowego

- jeśli jesteśmy w zakresie prądów ciągłych, wszystko ok - napięcie na wyjściu z pewnym opóźnieniem, po 1 okresie, będzie równe wartości zadanej

Uproszczenie



5

Układy sterowania prostowników

Sterowanie prędkością silnika DC zasilanego z prostownika tyristorowego

Zakres prądów ciągłych

Sterowanie **prądem twornika** odbywa się przy założeniu istnienia trzech członów inercyjnych pierwszego rzędu, połączonych szeregowo, o stałych czasowych: T_u , T_p , T_e gdzie T_u – opóźnienie generacji napięcia, T_i – opóźnienie pomiaru prądu, T_e – stała elektromagnetyczna silnika DC

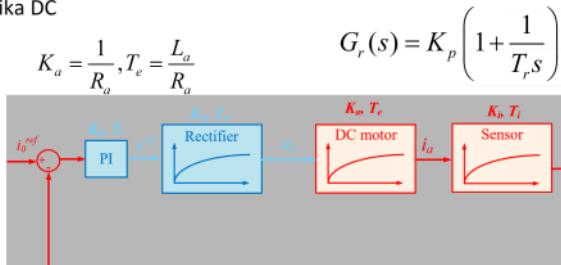
Regulator typu PI:

$$K_p = \frac{T_e}{2K_0 T_\sigma}$$

$$T_r = T_e$$

$$K_O = K_i K_u K_a,$$

$$T_\sigma = T_u + T_i$$



- możemy dobrać parametry tak, aby skasować największą stałą czasową (w tym przypadku: stała elektromagnetyczna silnika)
- zakres prądów nieciągłych:

6

Układy sterowania prostowników

Sterowanie prędkością silnika DC zasilanego z prostownika tyristorowego

Zakres prądów nieciągłych

Regulator typu I:

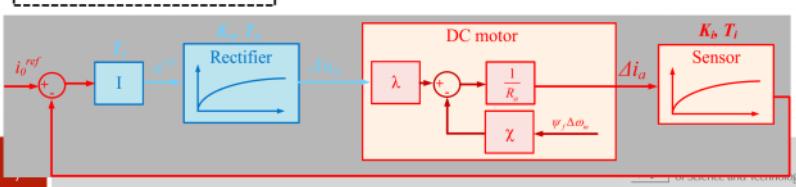
$$G_r(s) = \frac{1}{T_c s}$$

$$T_c = 2K_O \frac{T'_m}{\chi}$$

$$K_O = K_i K_u \frac{\lambda}{R_a}$$

$$\text{Transmitancja obwodu elektromagnetycznego silnika: } \lambda = \frac{\cos \vartheta_z - \cos \vartheta_w}{2 \cos \alpha \sin \frac{\pi}{q}}, \alpha = \vartheta_z - \frac{\pi}{3}$$

$$\Delta i_a(s) = \frac{\lambda}{R_a} \frac{s \frac{T'_m}{\chi}}{1 + s \frac{T'_m}{\chi}}$$



- w przypadku zwiększenia prędkości rośnie SEM, prąd w silniku powodowany jest różnicą SEM i napięcia
 - prędkość rośnie – różnica maleje – możliwości sterowania maleją
- prądy inaczej reagują na pojawiające się napięcie
- zmiana transmitancji: zmiana charakteru obciążenia sterowanego obiektu
- odpowiednie sterowanie: zmiana regulatora na I (całkujący)
 - szczegóły: wykład z automatyki
- prostownik w wydaniu tyristorowym będzie wpływać na zachowanie się układu, szczególnie w zakresie prądów nieciągłych

Układy sterowania prostowników

Właściwości prostowników PWM

Prostowniki PWM:

- zbudowane z elementów w pełni sterowalnych (np. tranzystorów),
- załączenia/wyłączenia odbywają się setki razy w ciągu jednego okresu (w przeciwnieństwie do prostowników sterowanych fazowo),
- modulacja PWM – mniejsze zniekształcenia, brak harmonicznych niskiego rzędu jak prostowniki sterowanych fazowo – filtry wejściowe i w obwodzie prądu stałego mogą mieć znacznie mniejsze rozmiary (konieczność tłumienia harmonicznych wynikających z modulacji napięcia PWM),
- kontrola współczynnika mocy,
- drukierunkowy przepływ energii: zmiana polaryzacji napięcia (w prostownikach z wyjściem prądowym) lub prądu (w prostownikach z wyjściem napięciowym, w przeciwnieństwie do prostowników sterowanych fazowo).
- napięcie wyższe niż napięcie prostownika diodowego (w przypadku prostownika z wyjściem napięciowym)

Struktury prostowników PWM:

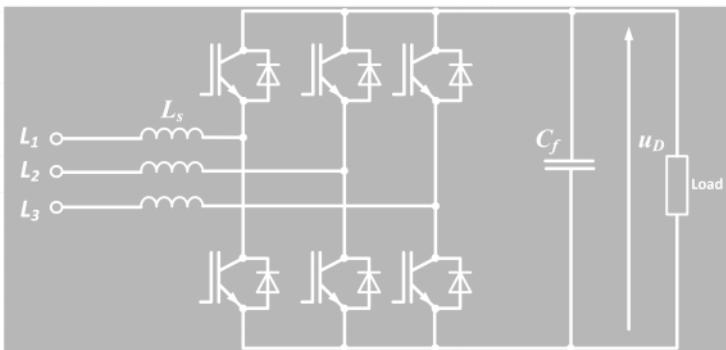
- Prostownik PWM z wyjściem napięciowym,
- Prostownik PWM z wyjściem prądowym,
- Prostownik PWM matrycowy.

- częstotliwości i harmoniczne odsuwają się w prawą stronę częstotliwości odsuwania (można je łatwo odfiltrować)
- ten sam filtr tłumii lepiej harmoniczne wysokiego rzędu niż niskiego
 - wysze f, wysze X
- drukierunkowy przepływ energii: zmienne polaryzacji prądu i napięcia; prąd może płynąć w dwie strony
- matrycowy: największa liczba przełączników, o nim tylko wspomnimy

8

Układy sterowania prostowników

Prostownik PWM z wyjściem napięciowym

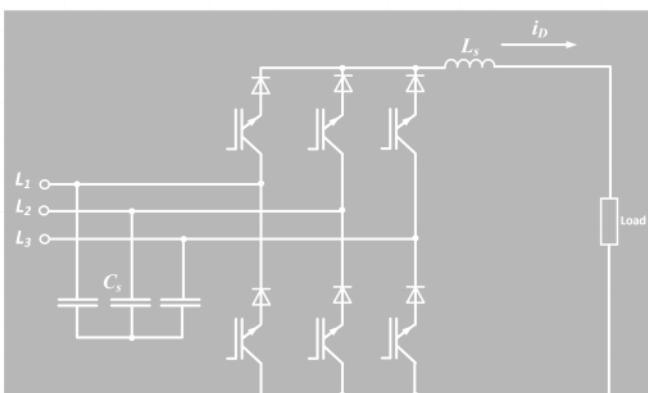


9

Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Prostownik PWM z wyjściem prądowym



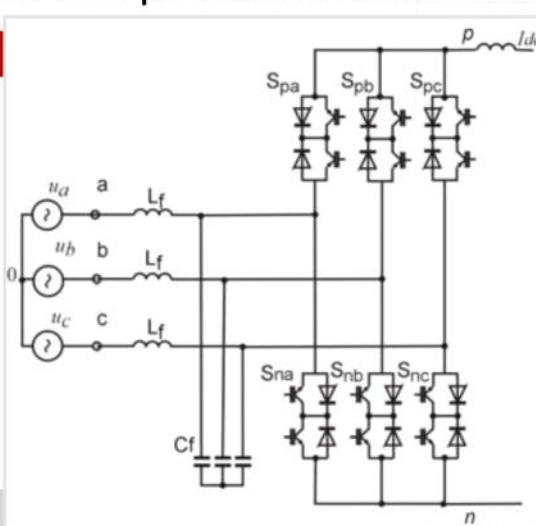
10

Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Prostownik matrycowy

- Elementy przełączalne – w pełni sterowalne
łączniki dwukierunkowe
(dwukierunkowy przepływ energii)
- Prostownik z wyjściem prądowym



11

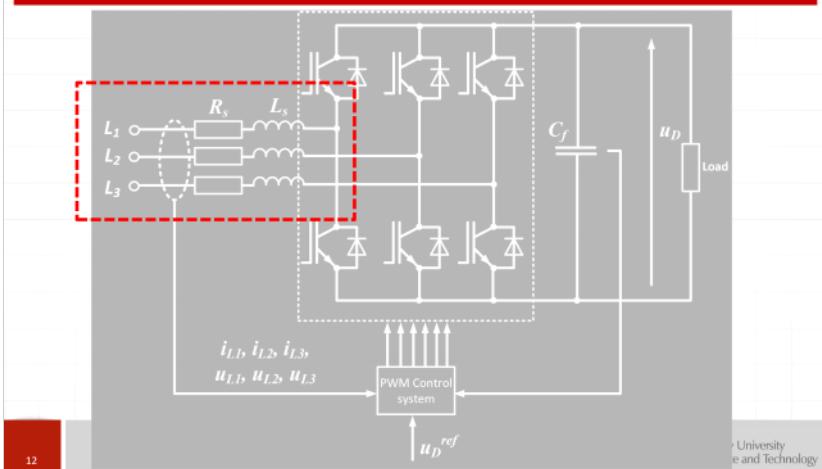
- schemat analogiczny do falowników
- 6 tranzystorów, 6 diod
- Mamy 6 diod i nie sterujemy żadnym tranzystorem, co wtedy?
 - Prostownik diodowy
 - z 400V mamy 570V
 - kluczowanie tranzystoram: brak możliwości zmniejszenia napięcia
- stałe napięcie, nadaje się do prostowników, ale nie do silników
- jest to jedno z pytań na zaliczenie: jakie napięcie można uzyskać w przypadku prostownika PWM?
 - Wysze niż w przypadku prostownika diodowego.
- jeśli mamy tranzystor, to jak często możemy nim sterować?
 - tyristor - 2 razy w ciągu okresu;
 - tranzystor: zmiany można dokonać setki razy w ciągu sekundy
- czy w prostowniku z tyristorami mogliśmy oddawać energię do sieci?

- struktura zmieniona w porównaniu do wyjścia napięciowego;
- poprzednio: kondensator źródłem napięcia, teraz: inducyjność
- pojawia się filtr napięciowy na wejściu
- tranzystory i diody są połączone szeregowo, nie równolegle: podobna sytuacja ma miejsce w falownikach prądu

- wersja z wyjściem prądowym
- dwa tranzystory, dwie diody, liczba kombinacji się zwiększa

Układy sterowania prostowników

Układy sterowania skalarnego – schemat ogólny (prostownik z wyjściem napięciowym)



12

- dziś: praktycznie tylko prostowniki z wyjściem napięciowym
- tutaj: układ ogólny, w którym mamy sygnały feedback i feedforward
 - mierzymy różne sygnały: napięcie na wyjściu - stabilizacja na zadanej wartości
 - czasem napięcia używa się np. tylko do synchronizacji

Układy sterowania prostowników

Układy sterowania skalarnego – schemat ogólny

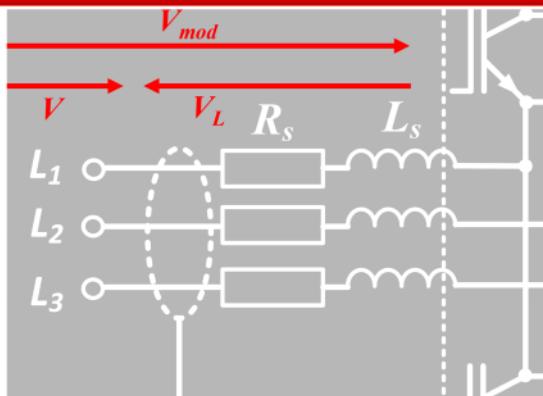
V – napięcie zasilające:

$$V = V_{max} \sin \omega t$$

$$V_L = R_s i_{L1} + L_s \frac{di_{L1}}{dt}$$

$$V_L = (R_s + j\omega L_s) i_{L1}$$

V_{mod} – napięcie modulujące

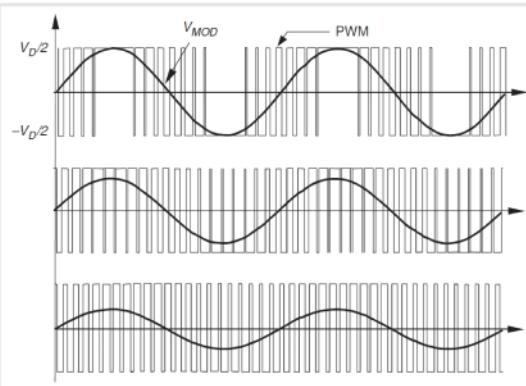


13

- filtr pomaga wytworzyć napięcie V_{mod} , którego potrzebujemy
- stałe napięcie zasilające, żeby napięcie pojawiające się dalej na prostowniku zmienić, musimy odpowiednio modulować tranzystory, żeby tutaj pojawił się odpowiedni spadek napięcia
- możemy zapisać spadek napięcia na każdej fazie z prawa ohma
- można to też zapisać w formie wektorowej i analizować wektorowo
- my tworzymy napięcie modulujące, na indukcyjności odkłada się napięcie i mamy napięcie zasilające
- napięcie modulujące: w zależności od wzoru *modulacji* możemy wytworzyć co do wartości 1. harmonicznej różne napięcia

Układy sterowania prostowników

Modulacja szerokości impulsów (MSI, PWM)

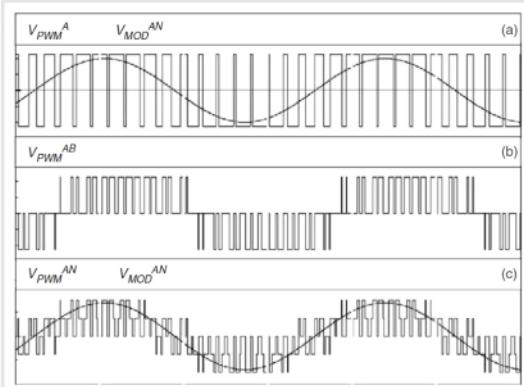


14

- bez trudu jesteśmy w stanie przesunąć ten wzór, żeby przesunąć fazę sygnału
- kwestią tego, jaki wzór sterowania dobierzemy
- czarny przebieg: pierwsza harmoniczna
- odpowiednio modulując można zmienić amplitudę i położenie w czasie (czyli fazę)

Układy sterowania prostowników

Modulacja szerokości impulsów (MSI, PWM)

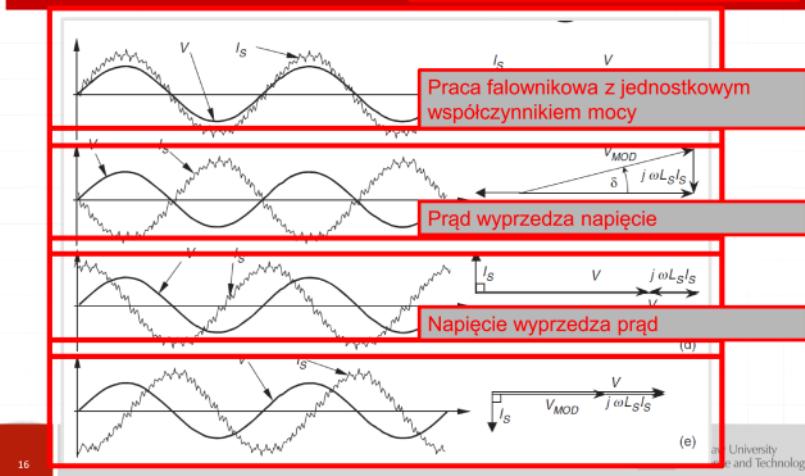


15

Wrocław University
of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

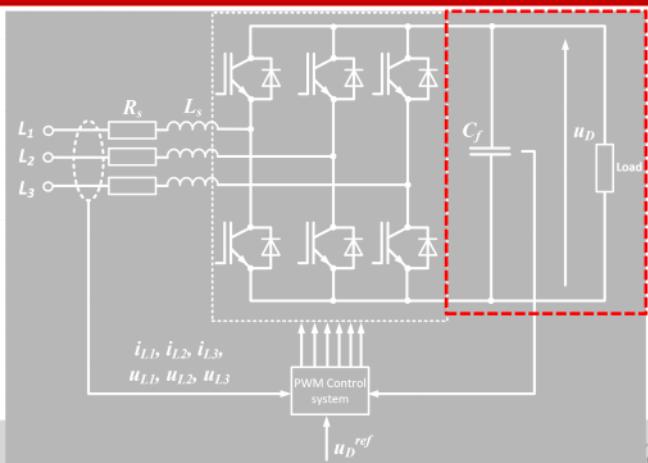
Praca prostownicza z jednostkowym współczynnikiem mocy



16

Układy sterowania prostowników

Układy sterowania skalarnego – schemat ogólny (prostownik z wyjściem napięciowym)



17

- sygnały modulujące: wyżej. napięcie modulujące: tutaj
- napięcie międzyfazowe będzie przyjmowało 3 wartości: 0, +, -
- napięcie fazowe: 5 wartości, 1/3, 2/3, -1/3, -2/3, 0
- napięcie modulujące: to poszatkowane na dole

Układy sterowania prostowników

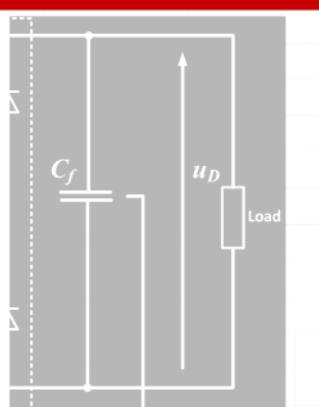
Układy sterowania skalarnego – schemat ogólny (prostownik z wyjściem napięciowym)

I prawo Kirchhoffa:

$$i_d(t) = i_C(t) + i_{load}(t)$$

Napięcie stałe:

$$u_D(t) = C \frac{d(i_d - i_{load})}{dt}$$

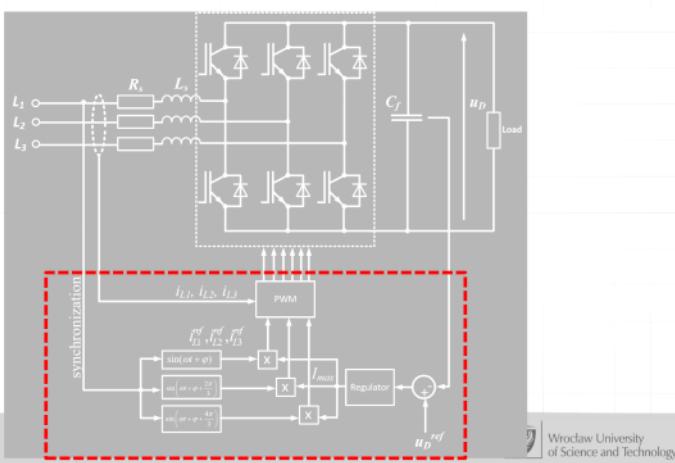


18

Wrocław University
of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Układ sterowania prostownika PWM z wymuszeniem prądowym

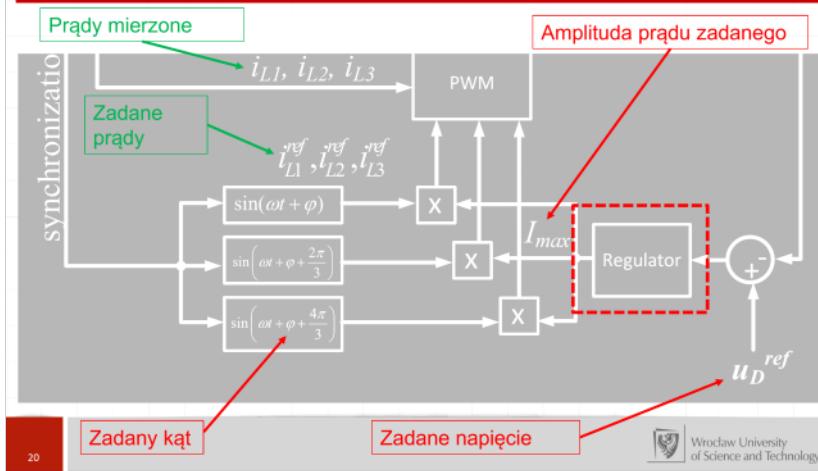


19

Wrocław University
of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Układ sterowania prostownika PWM z wymuszeniem prądowym



20

Wrocław University
of Science and Technology

- mamy napięcie na kondensatorze; metoda wektorowa: od czego to napięcie należy?

Układy sterowania prostowników

Schemat zastępczy regułacji napięcia wyjściowego

Regulator:

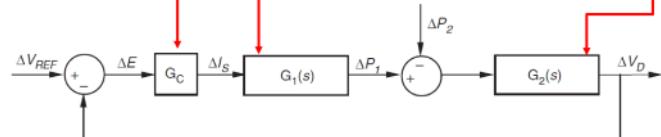
- Regulator PI
- Regulator rozmyty
- Regulator śлизgowy
- Regulator neuronowy
- Regulator predykcyjny

Transmitancja prostownika:

$$G_1(s) = \frac{\Delta P_1(s)}{\Delta I_s(s)} = 3(V \cos \varphi - 2RI_s - L_s I_s s)$$

Transmitancja obwodu prądu stałego:

$$G_2(s) = \frac{\Delta V_d(s)}{\Delta P_1(s) - \Delta P_2(s)} = \frac{1}{V_d C_f s}$$

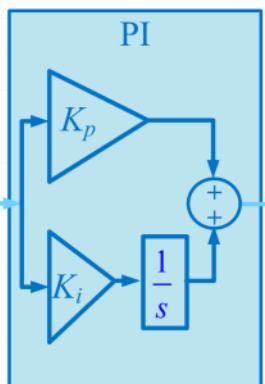


21

Wrocław University
of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Stabilność regulatora PI



Wzmocnienia regulatora PI powinny spełniać następujące warunki:

$$I_s \leq \frac{C_f V_D}{3K_p L_s}$$

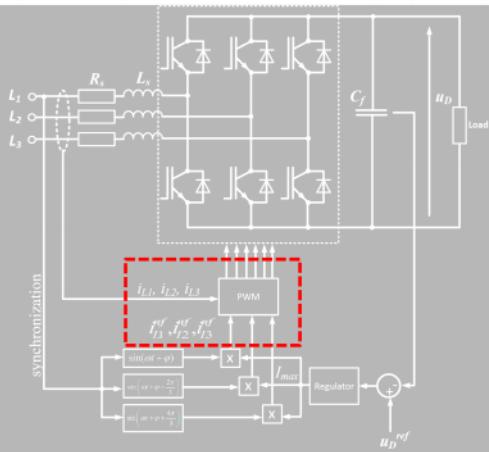
$$I_s \leq \frac{K_p V \cos \varphi}{2RK_p + L_s K_i}$$

22

Wrocław University
of Science and Technology

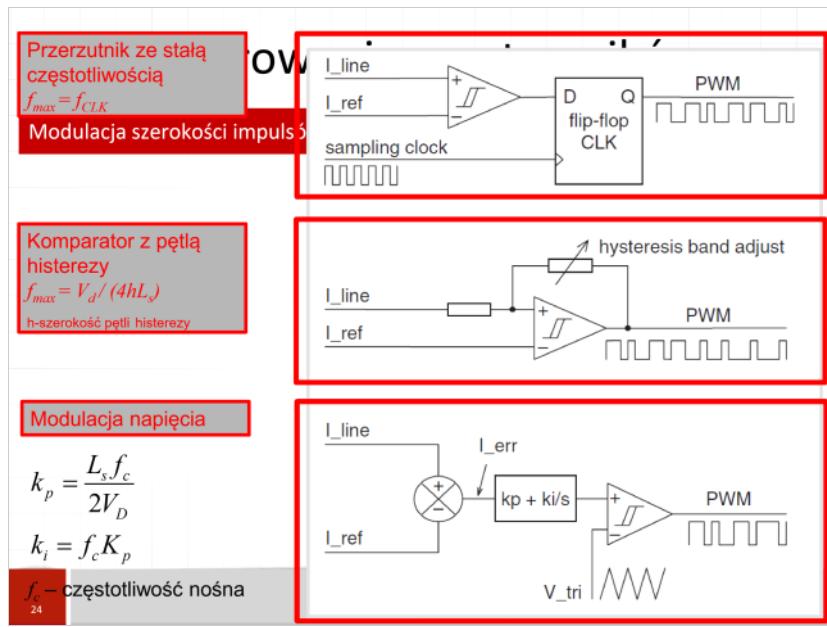
Układy sterowania prostowników

Układ sterowania prostownika PWM z wymuszeniem prądowym



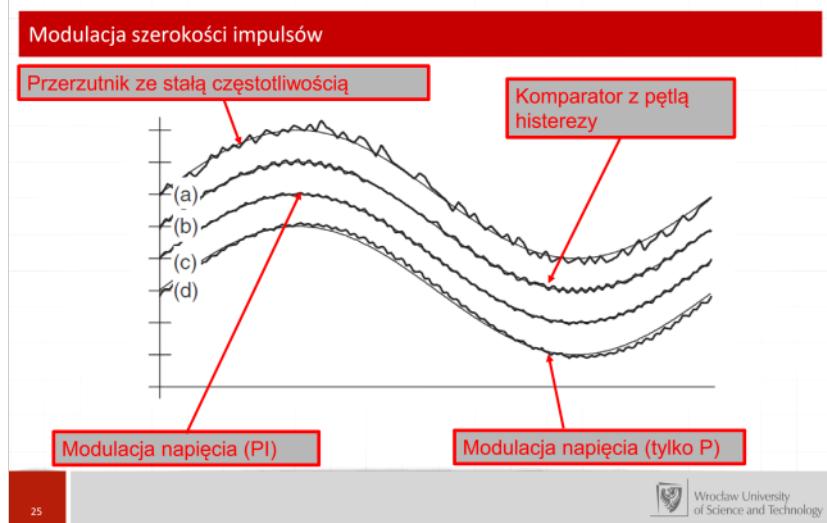
23

Wrocław University
of Science and Technology

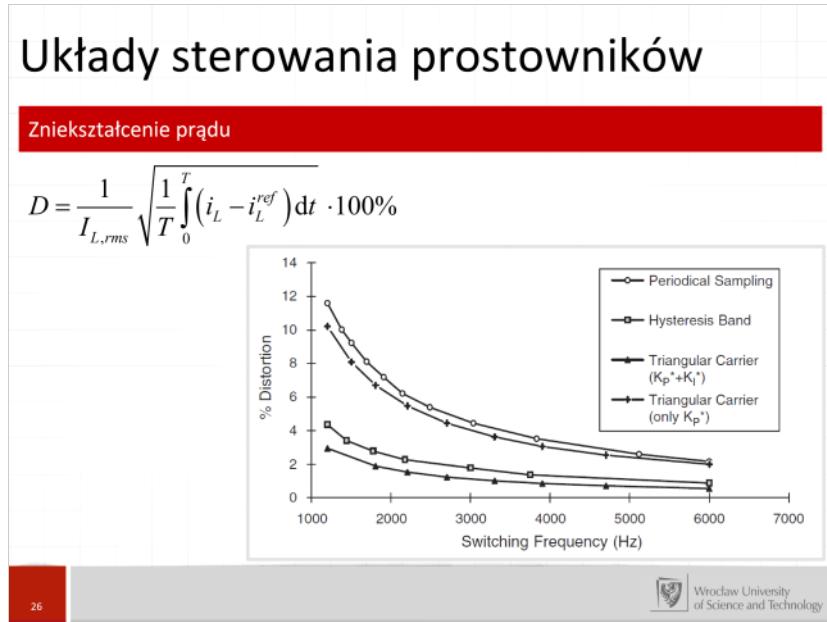


- każdy z tych układów dotyczy jednej fazy -> mamy 3 takie układy, które odpowiadają na pytanie jak sterować górnymi tranzystorami w takim układzie

Układy sterowania prostowników



- porównanie 4 metod
- to wszystko jest ciągłe prostownikiem
 - napięcie jest przemienne, ale mówimy o napięciu zasilającym z sieci



- w przypadku PI jakość jest najlepsza (najmniejsze zniekształcenie prądu)

Układy sterowania prostowników

Układ sterowania prostownika PWM z wymuszeniem napięciowym

Napięcie zasilające: $v(t) = L_s \frac{di_{L1}}{dt} + R_s i_{L1} + v_{mod}(t)$

$$v(t) = V_m \sin \omega t$$

Zadany prąd: $i_{L1}(t) = I_{max} \sin(\omega t + \varphi)$

Funkcja modulująca:

$$v_{mod}(t) = \left(V_m + X_s I_{max} \sin \varphi - \left(R_s I_{max} + L_s \frac{dI_{max}}{dt} \right) \cos \varphi \right) \sin \omega t + \\ - \left(X_s I_{max} \cos \varphi + \left(R_s I_{max} + L_s \frac{dI_{max}}{dt} \right) \sin \varphi \right) \cos \omega t$$

27

Układy sterowania prostowników

Układ sterowania prostownika PWM z wymuszeniem napięciowym

Dla jednostkowego współczynnika mocy:

$$\cos \varphi = 1, \sin \varphi = 0,$$

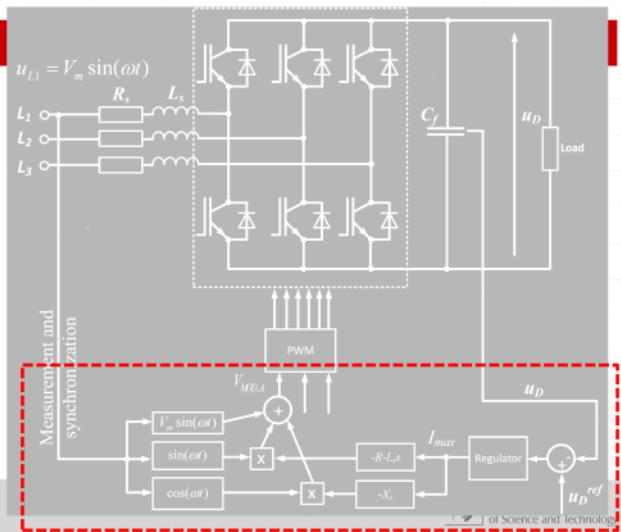
Funkcja modulująca:

$$v_{mod}(t) = \left(V_m - R_s I_{max} - L_s \frac{dI_{max}}{dt} \right) \sin \omega t - X_s I_{max} \cos \omega t = \\ V_m \sin \omega t + (-R_s - L_s s) I_{max} \sin \omega t - X_s I_{max} \cos \omega t$$

28

Układy sterowania prostowników

Sterowanie skalarne z wymuszeniem napięciowym

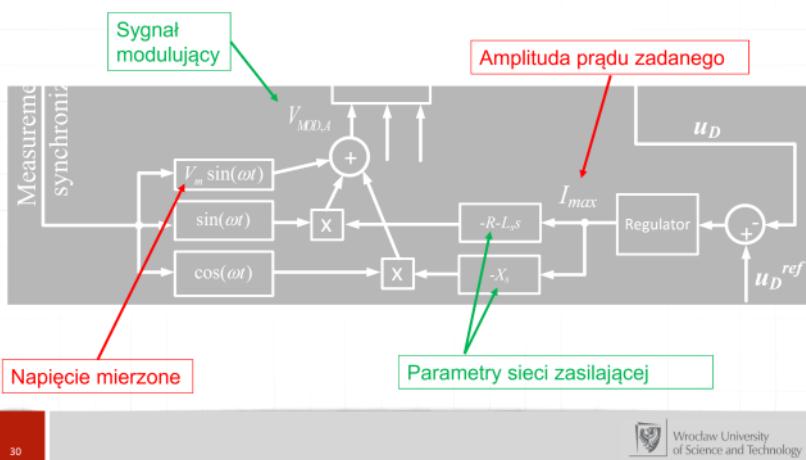


29

- wymuszenie napięciowe - nie mamy zadanych prądów, tylko napięcia
- jeśli mamy napięcie zasilające, mamy spadek napięcia i napięcie modulujące

Układy sterowania prostowników

Sterowanie skalarne z wymuszeniem napięciowym



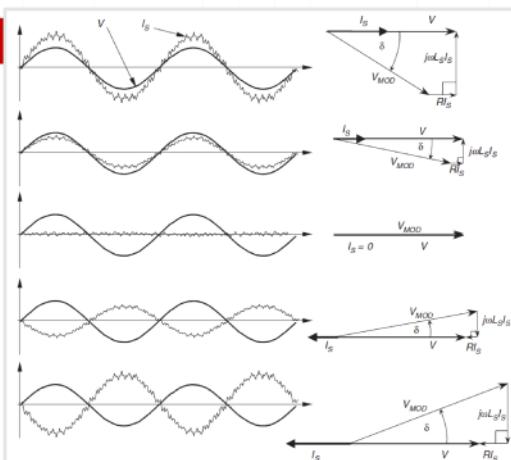
30

Wrocław University
of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Stan ustalony

Sterowanie
skalarne z
wymuszeniem
napięciowym



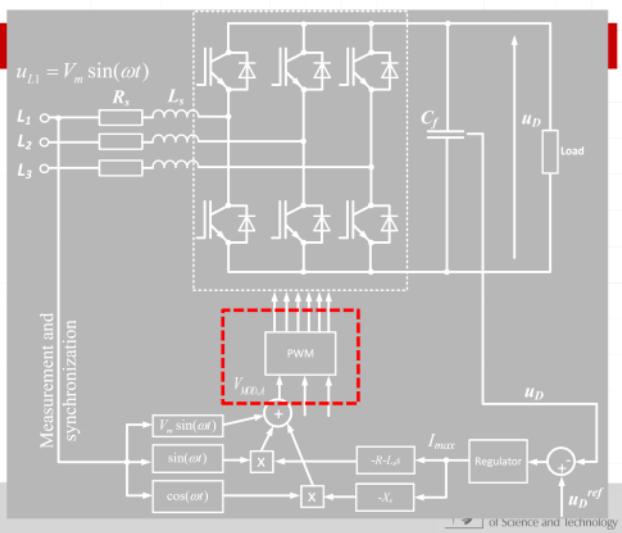
31

Stan ustalony: $V_{mod} = V - (R_s + jX_s) I_s$

Wrocław University
of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Sterowanie
skalarne z
wymuszeniem
napięciowym

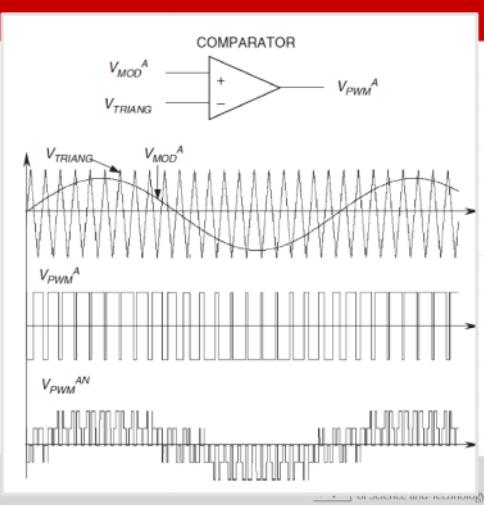


32

- to, co było wyżej równaniem, teraz jest w postaci blokowej
- sygnały zadane są napięciami
- mierzymy napięcie sieci, dodajemy dwa składniki, przeliczamy, mamy napięcie modulujące.
- musimy zastosować wymuszenie napięciowe

Układy sterowania prostowników

Sinusoidalna modulacja napięcia

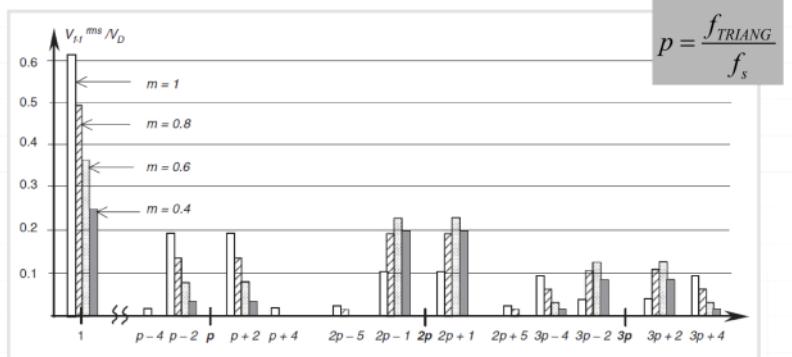


33

- najprostsza metoda modulacji: sinusoidalna
- można zastosować przebieg pilokształtny
- układ sterowania wymusza sygnał, który będzie sinusem; porównujemy go z trójkątem i otrzymujemy wzór (pattern)
- interesuje nas napięcie fazowe, napięcie modulujące
- 1 harmoniczna: identyczna z napięciem zadanym
-

Układy sterowania prostowników

Analiza widmowa - FFT



34

Wroclaw University
of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Zwiększenie prądu

Zalecenia:

$p < 21$, sygnały zadane i sygnał nośny powinny być zsynchonizowane

p - wartość całkowita, żeby uniknąć subharmonicznych

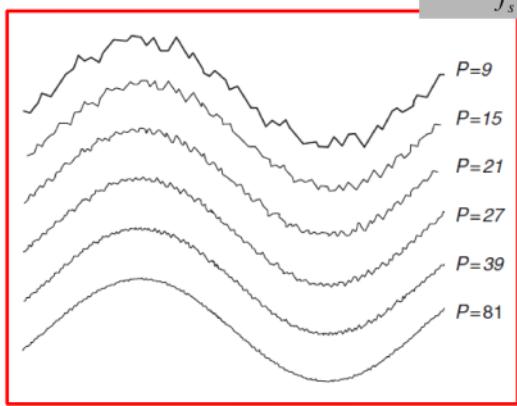
p - nieparzyste, żeby uniknąć parzystych harmonicznych

p - wielokrotność 3, żeby uzyskać jednakową modulację dla każdej fazy

Nadmodulacja:

$m > 1$

- im wyższa częstotliwość modulacji trójkąta, tym sygnał jest bardziej zbliżony do sinusa (zadanego) i jego jakość się poprawia wraz z rosnącym częstotliwościowym współczynnikiem modulacji

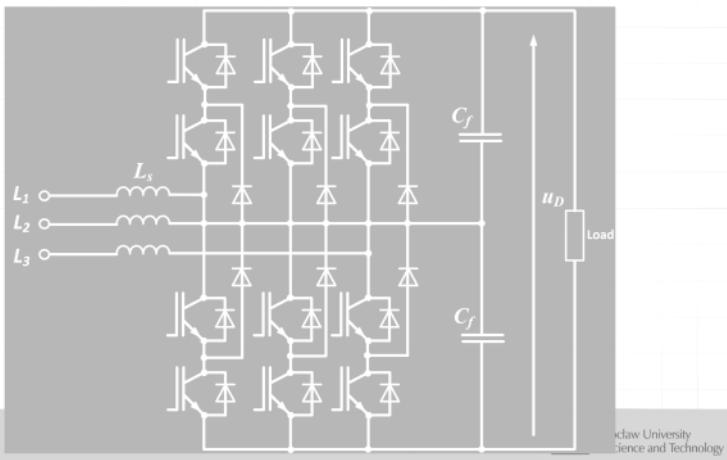


35

Wroclaw University
of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Wielopoziomowe prostowniki (trójpoziomowy)

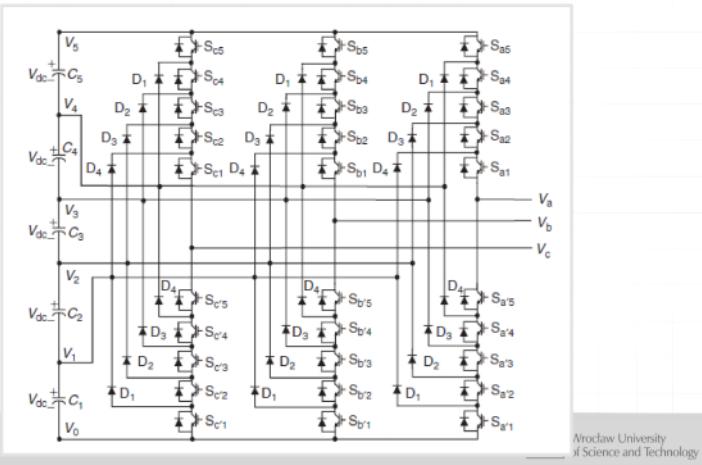


36

- poziom w nazwie oznacza, że każda faza wejściowa falownika może być podłączona do trzech poziomów napięcia, poprzednio mieliśmy dwa poziomy
- większa liczba poziomów napięcia (+, -, 0) powoduje że mamy większą liczbę poziomów napięcia fazowego i międzyfazowego (mówimy o zasilaniu)
- prąd pobierany z zasilania przy większej liczbie poziomów ma lepszą jakość (bardziej przypomina sinus)

Układy sterowania prostowników

Wielopoziomowe prostowniki (sześciopoziomowy)

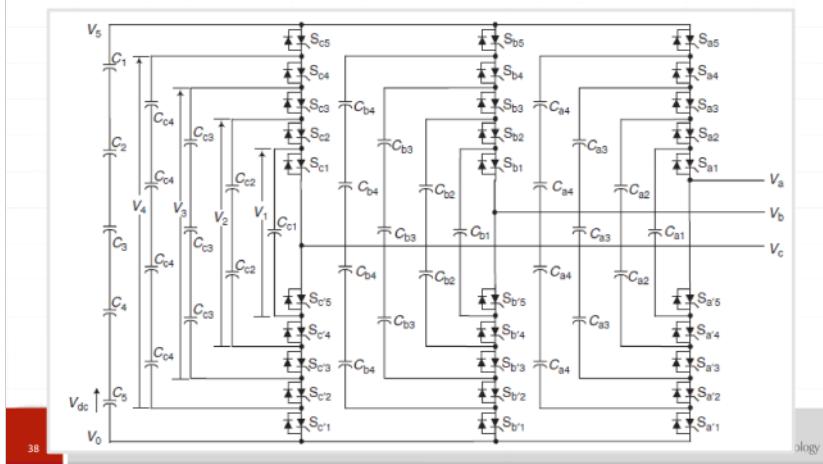


37

- więcej poziomów: większy problem ze sterowaniem
- napięcia nie muszą się rozkładać równomiernie

Układy sterowania prostowników

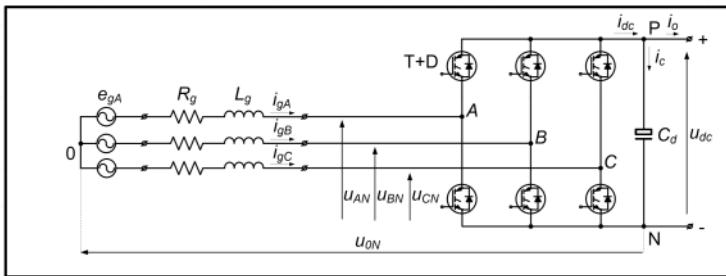
Wielopoziomowe prostowniki (sześciopoziomowy)



38

Układy sterowania prostowników

Model prostownika PWM



Równania napięciowe:

$$e_{gA} - L_g \frac{d}{dt} i_{gA} - R_g i_{gA} = u_{AN} - u_{N0}$$

$$e_{gB} - L_g \frac{d}{dt} i_{gB} - R_g i_{gB} = u_{BN} - u_{N0}$$

$$e_{gC} - L_g \frac{d}{dt} i_{gC} - R_g i_{gC} = u_{CN} - u_{N0}$$

39

Wrocław University of Science and Technology

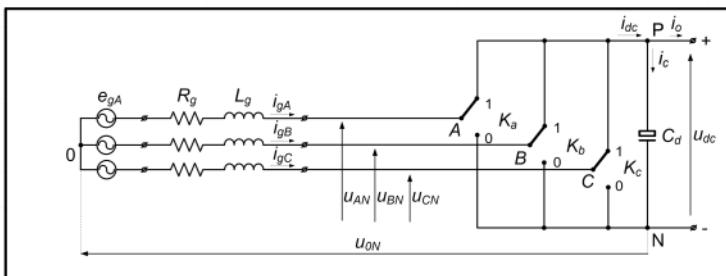
- sterowanie wektorowe

- do tej pory mówiliśmy o sterowaniu skalarne
- w prawidłowym: modulacja prądu i napięcia, w napięciowym: modulacja napięcia, natomiast równania bazowały na stanie ustalonym - taka jest definicja sterowania skalarnego

- podobnie jak w silniku: 3 fazy, rezystancja, indukcyjność, SEM (źródło zasilania)
- można przyjąć, że ten schemat z prawej to wirtualna maszyna indukcyjna o stałej częstotliwości obrotów
- równania nieco różne, musimy uwzględnić prąd wyjściowy
- punkt zerowy i neutralny są różne, nastąpi spadek napięcia między nimi; można definiować napięcia względem N i względem 0
-

Układy sterowania prostowników

Model prostownika PWM



Równania napięciowe:

$$e_{gA} - L_g \frac{d}{dt} i_{gA} - R_g i_{gA} = u_{AN} - u_{N0}$$

$$e_{gB} - L_g \frac{d}{dt} i_{gB} - R_g i_{gB} = u_{BN} - u_{N0}$$

$$e_{gC} - L_g \frac{d}{dt} i_{gC} - R_g i_{gC} = u_{CN} - u_{N0}$$

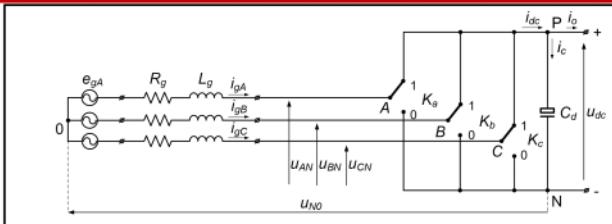
40

Wrocław University of Science and Technology

- przerutnik między 0 a 1 - de facto układ spełnia taką rolę, podłącza punkty A, B, C do 0, + lub - na wyjściu
- w zależności od przełączników będą się zmieniać napięcia i prądy po prawej stronie

Układy sterowania prostowników

Model prostownika PWM



Napięcia fazowe względem N:

$$u_{AN} = K_a u_{dc}$$

$$u_{BN} = K_b u_{dc}$$

$$u_{CN} = K_c u_{dc}$$

$$K_a, K_b, K_c \in \{0, 1\}$$

Napięcia względem 0:

$$u_{A0} = u_{AN} + u_{N0}$$

$$u_{B0} = u_{BN} + u_{N0}$$

$$u_{C0} = u_{CN} + u_{N0}$$

$$u_{N0} = -\frac{1}{3} u_{dc} (K_a + K_b + K_c)$$

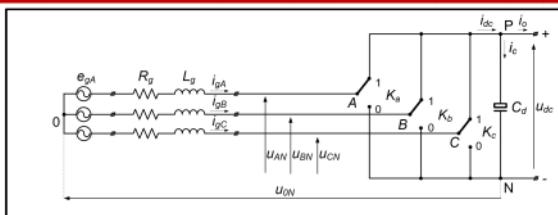
41

Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

- po zamianie: napięcia od A,B,C do punktu zerowego

Model prostownika PWM



Równania napięciowe:

$$e_{gA} - L_g \frac{d}{dt} i_{gA} - R_g i_{gA} = u_{AN} - u_{N0}$$

$$e_{gB} - L_g \frac{d}{dt} i_{gB} - R_g i_{gB} = u_{BN} - u_{N0}$$

$$e_{gC} - L_g \frac{d}{dt} i_{gC} - R_g i_{gC} = u_{CN} - u_{N0}$$

$$e_{gA} - L_g \frac{d}{dt} i_{gA} - R_g i_{gA} - u_{A0} = 0$$

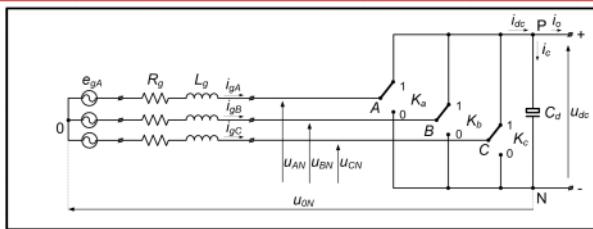
$$e_{gB} - L_g \frac{d}{dt} i_{gB} - R_g i_{gB} - u_{B0} = 0$$

$$e_{gC} - L_g \frac{d}{dt} i_{gC} - R_g i_{gC} - u_{C0} = 0$$

42

Układy sterowania prostowników

Model prostownika PWM



Równania dynamiki prądów:

$$\frac{d}{dt} i_{gA} = \frac{1}{L_g} \left[e_{gA} - R_g i_{gA} - \frac{1}{3} u_{dc} (2K_a - K_b - K_c) \right]$$

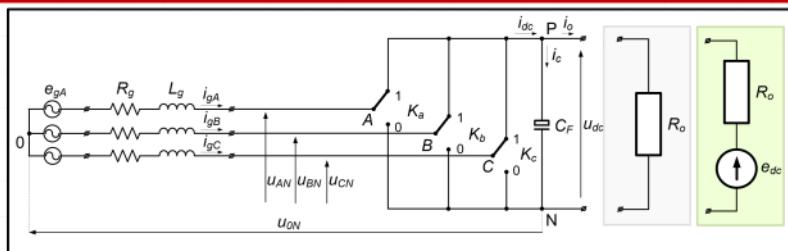
$$\frac{d}{dt} i_{gB} = \frac{1}{L_g} \left[e_{gB} - R_g i_{gB} - \frac{1}{3} u_{dc} (2K_b - K_a - K_c) \right]$$

$$\frac{d}{dt} i_{gC} = \frac{1}{L_g} \left[e_{gC} - R_g i_{gC} - \frac{1}{3} u_{dc} (2K_c - K_a - K_b) \right]$$

43

Układy sterowania prostowników

Model prostownika PWM



Równania prądowe:

$$i_{dc} = i_c + i_o = C_d \frac{d}{dt} u_{dc} + \frac{u_{dc} - e_{dc}}{R_o}$$

$$i_{dc} = K_a i_{gA} + K_b i_{gB} + K_c i_{gC}$$

$$\frac{d}{dt} u_{dc} = \frac{1}{C_d} \left(K_a i_{gA} + K_b i_{gB} + K_c i_{gC} - \frac{u_{dc} - e_{dc}}{R_o} \right)$$

44

- napięcie będzie się zmieniało od sygnałów zasilających
- rezystancja jako jedyna wpływa na średnią wartość napięcia

Układy sterowania prostowników

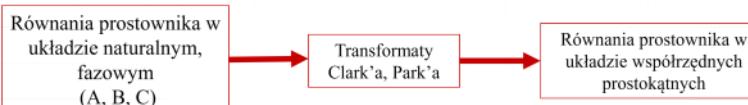
Sterowanie wektorowe prostownikiem PWM - wnioski

- Prądy wejściowe jak i napięcie wyjściowe prostownika PWM zależą od sygnałów sterujących tranzystorami (K_a, K_b, K_c).
- Zastosowanie dławików sieciowych:
 - pozwala osiągnąć ciągłość prądów falownika,
 - Umożliwiają ustabilizować napięcie wyjściowe na wartości wyższej niż w przypadku prostownika niesterowanego (diadowego) – podobnie jak w przypadku przekształtników DC/DC podwyższających energię, ze względu na energię pola magnetycznego dławików
- Dwukierunkowy przepływ mocy
- Prądy wejściowe są zbliżone do sinusoidalnych
- Współczynnik mocy może być równy $\cos\varphi=1$.

45

Układy sterowania prostowników

Transformacje układów współrzędnych



Transformata Clark'a

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix}$$

Transformata Park'a

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}$$

Układy współrzędnych:

$\alpha-\beta$ – stacjonarny

d-q – wirujący z pewną prędkością kątową. Pozycja osi d względem osi α zdefiniowana jest jako kąt γ .

46

Układy sterowania prostowników

Model prostownika PWM

Układ naturalny (A, B, C)

↓ Transformata Clark'a

Model w układzie $\alpha-\beta$

$$L_g \frac{d}{dt} i_{g\alpha} = e_{g\alpha} - R_g i_{g\alpha} - u_{dc} K_d$$

$$L_g \frac{d}{dt} i_{g\beta} = e_{g\beta} - R_g i_{g\beta} - u_{dc} K_q$$

$$C_d \frac{d}{dt} u_{dc} = K_d i_{g\alpha} + K_q i_{g\beta} - \frac{u_{dc}}{R_o}$$

przy czym:

$$K_d = \frac{2}{3} \left(K_a - \frac{1}{2} (K_b + K_c) \right)$$

$$K_q = \frac{\sqrt{3}}{3} (K_b - K_c)$$

Model w układzie d-q

$$L_g \frac{d}{dt} i_{gd} = e_{gd} - R_g i_{gd} - u_{dc} K_d + \omega L_g i_{gq}$$

$$L_g \frac{d}{dt} i_{gq} = e_{gq} - R_g i_{gq} - u_{dc} K_q + \omega L_g i_{gd}$$

$$C_d \frac{d}{dt} u_{dc} = K_d i_{gd} + K_q i_{gq} - \frac{u_{dc}}{R_o}$$

gdzie:

$$K_d = K_\alpha \cos(\omega t) + K_\beta \sin(\omega t)$$

$$K_q = K_\beta \cos(\omega t) - K_\alpha \sin(\omega t)$$

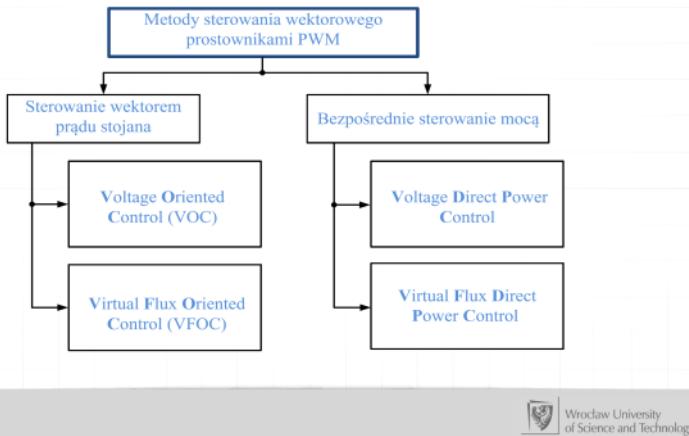
Transformata Park'a

47

- omega - częstotliwość pulsowania układu zasilającego (napięcia) - nie ma tego w układzie alfa-beta, bo tam przyjmuje się omega=0

Układy sterowania prostowników

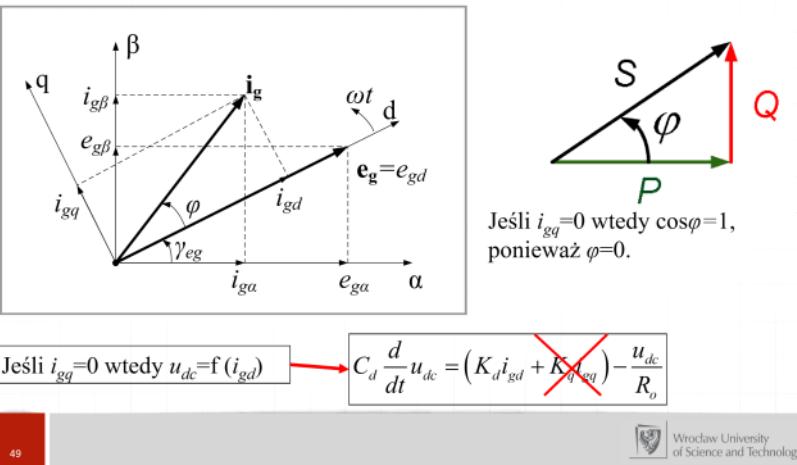
Klasyfikacja metod sterowania wektorowego prostowników PWM



48

Układy sterowania prostowników

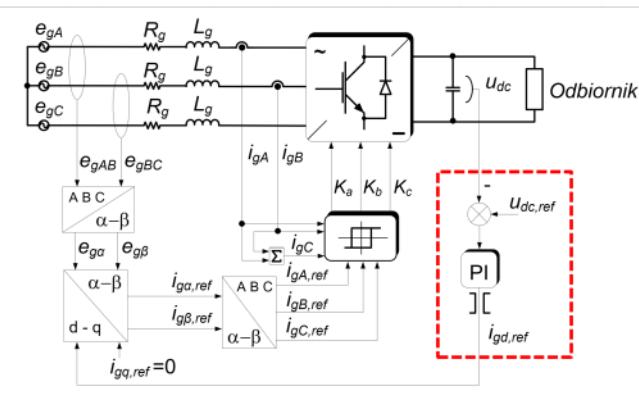
Voltage Oriented Control (VOC)



49

Układy sterowania prostowników

Voltage Oriented Control; modulacja napięcia z wymuszeniem prądowym (regulator histerezowy) – schemat blokowy



50

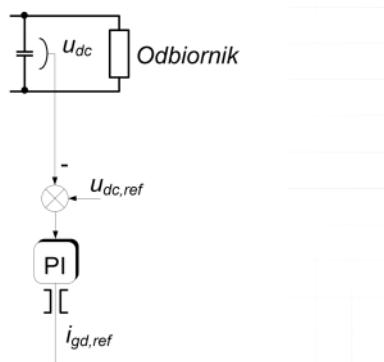
- równania skalarne - stan ustalony, wektory - stany dynamiczne
- operujemy na wektorach, nie przebiegach fazowych
- VDPC, VFDPC - bazują na tablicach

Układy sterowania prostowników

Voltage Oriented Control; modulacja napięcia z wymuszeniem prądowym
(regulator histerezowy) – schemat blokowy

Jeśli $i_{gq}=0$ wtedy $u_{dc}=f(i_{gd})$

$$C_d \frac{d}{dt} u_{dc} = \left(K_d i_{gd} + K_{i_{gq}} \right) - \frac{u_{dc}}{R_o}$$

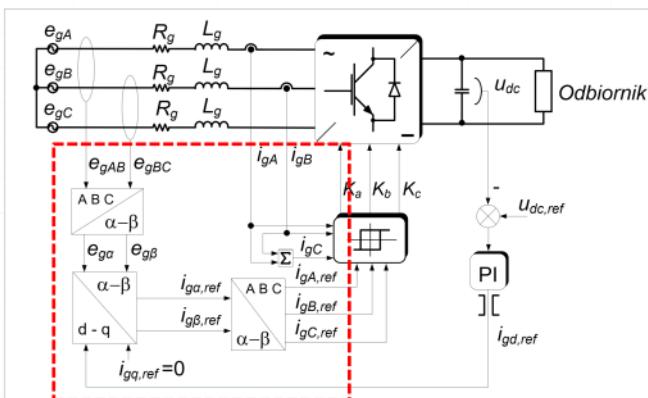


51

Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Voltage Oriented Control; modulacja napięcia z wymuszeniem prądowym
(regulator histerezowy) – schemat blokowy

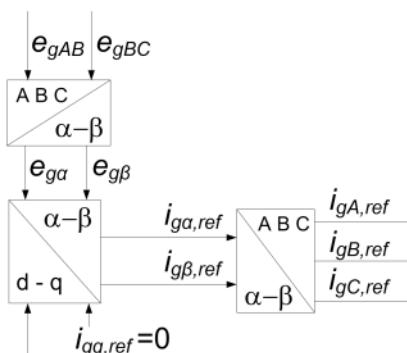
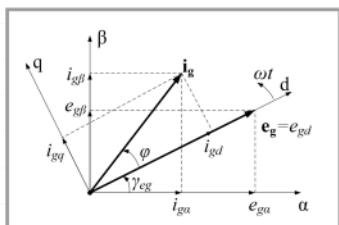


52

Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Przekształcenia pomiędzy układami współrzędnych



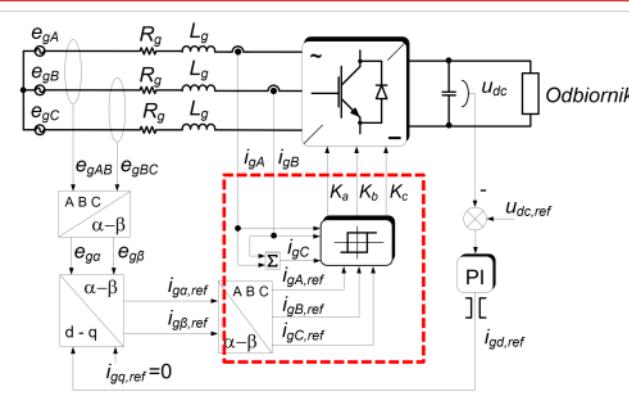
53

Wrocław University of Science and Technology

- regulator PI wymusza składową i_{dg}
- znaczek $]$ oznacza ograniczenie prądu wymuszenia

Układy sterowania prostowników

Voltage Oriented Control; modulacja napięcia z wymuszeniem prądowym (regulator histerezowy) – schemat blokowy



54

Wrocław University
of Science and Technology

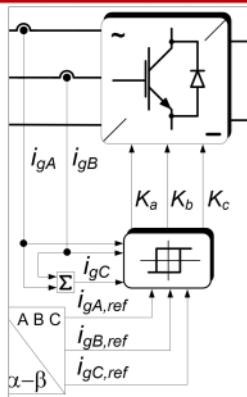
Układy sterowania prostowników

Voltage Oriented Control; modulacja napięcia z wymuszeniem prądowym (regulator histerezowy) – schemat blokowy

jeśli $i_{gA} < i_{gA,ref}$ $K_A = 1$

jeśli $i_{gB} < i_{gB,ref}$ $K_B = 1$

jeśli $i_{gC} < i_{gC,ref}$ $K_C = 1$

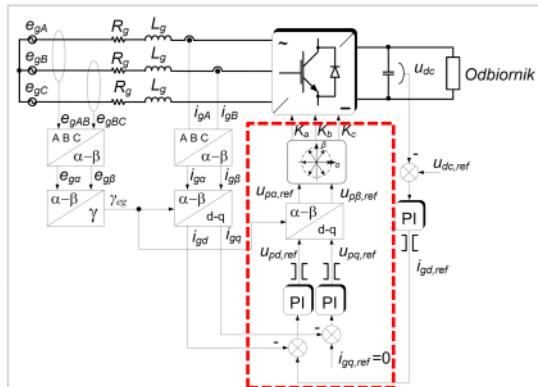


55

Wrocław University
of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

Voltage Oriented Control; wektorowa modulacja napięcia – schemat blokowy



56

Wrocław University
of Science and Technology

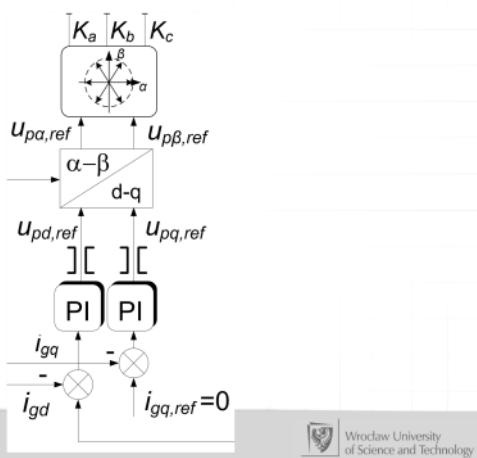
- modulator z pętlą histerezy - prąd za mały, załączamy napięcie; prąd za duży, zmniejszamy napięcie
- to tutaj: falownik napięcia

- musimy mieć zadane napięcia (modulacja napięciowa)
- dwie składowe prądu są sterowane poprzez odpowiednie regulatory
- składowa d ~ napięcie d, składowa q ~ napięcie q
- dwa tory transformacji: pierwsze to wyznaczenie kąta, drugi to sprzążenie zwrotne
- zawsze przed regulatorem jest sygnał sprzężenia ujemnego

Układy sterowania prostowników

Voltage Oriented Control; wektorowa modulacja napięcia – schemat blokowy

- Modulacja napięcia – modulacja wektorowa
- Sterowanie składowymi prądu poprzez sterowanie odpowiednimi składowymi wektora napięcia



57

Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania prostowników

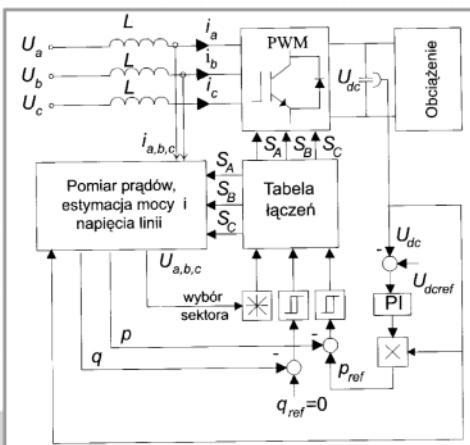
Direct Power Control – schemat blokowy

DPC – analogia do DTC (bezpośrednie sterowanie momentem silnika indukcyjnego)

$$p = L \left(\frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + U_{dc} (S_A i_a + S_B i_b + S_C i_c)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 3L \left(\frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) + \\ -U_{dc} \left(S_A (i_b - i_c) + S_B (i_c - i_a) + S_C (i_a - i_b) \right) \end{pmatrix}$$

58



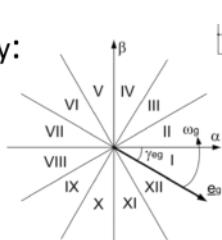
- moce są zaszyte w układzie sterowania
- możemy wyestymować bierną moc chwilową
- trzeba wybrać sektor, w którym aktualnie jest napięcie

Układy sterowania prostowników

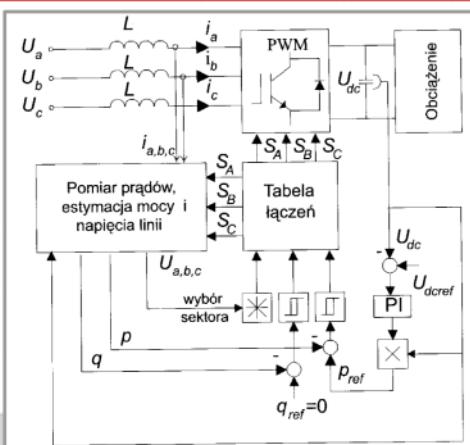
Direct Power Control – schemat blokowy

DPC – analogia do DTC (bezpośrednie sterowanie momentem silnika indukcyjnego)

Sektor:



59



- 12 sektorów

Układy sterowania prostowników

Virtual Flux Direct Power Control – schemat blokowy

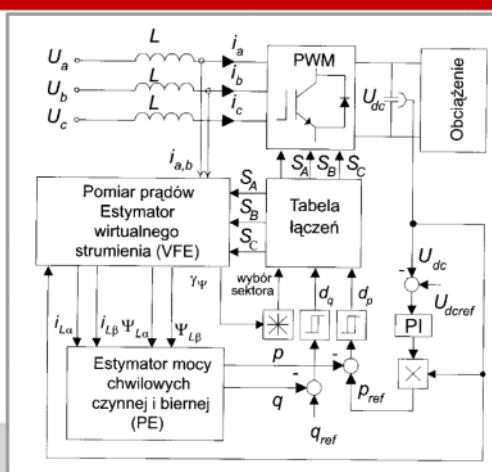
DPC – analogia do DTC
(bezpośrednie sterowanie momentem silnika indukcyjnego)

Chwilowa moc czynna i bierna:

$$p = \omega (\Psi_{L\alpha} i_{L\beta} - \Psi_{L\beta} i_{L\alpha})$$

$$q = \omega (\Psi_{L\alpha} i_{L\alpha} + \Psi_{L\beta} i_{L\beta})$$

60



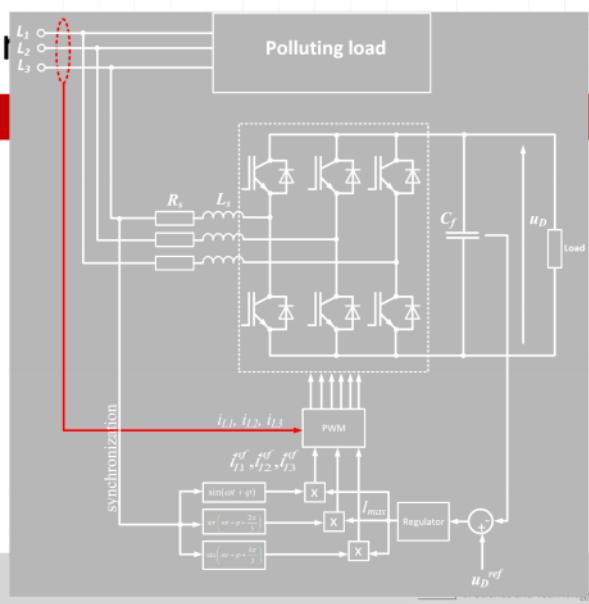
- element estymuje wirtualne strumienie (takie, które byłyby w silniku indukcyjnym, gdyby to był silnik indukcyjny)
- można stworzyć wirtualny strumień
- po wyestymowaniu obliczanie mocy jest wygodne

Układy sterowania prostowników

Filtr aktywny

Zastosowanie prostownika-filtr aktywny

61



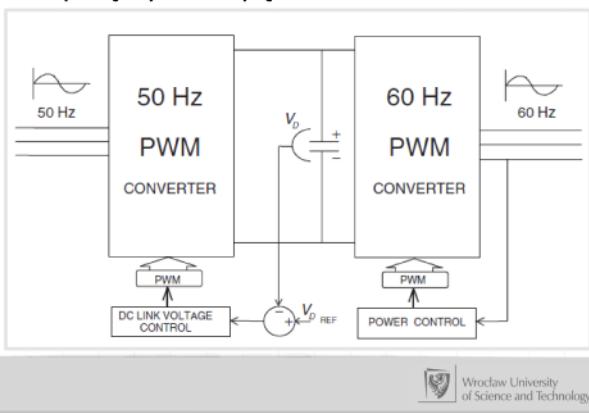
- to nie jest jedyna struktura filtru, którą można zastosować
- układy energoelektroniczne wprowadzają zakłócenia (wyższe harmoniczne) do sieci
- można wprowadzić filtry bierne (pasywne), ale filtr aktywny nadąża za zmianami wartości częstotliwości, amplitud, etc.
- prądy na wejściu - sinusoidalne, wymuszone- byłyby niesymetryczne, zakłócone; układ ma za zadanie ich "wyczyszczenie", wyjściowe prądy pobierane z sieci mają być sinusoidalne (ofc. nieidealnie)
- zużycie energii

Układy sterowania prostowników

Zastosowanie prostowników

Co gdybyśmy chcieli połączyć Europę z USA...

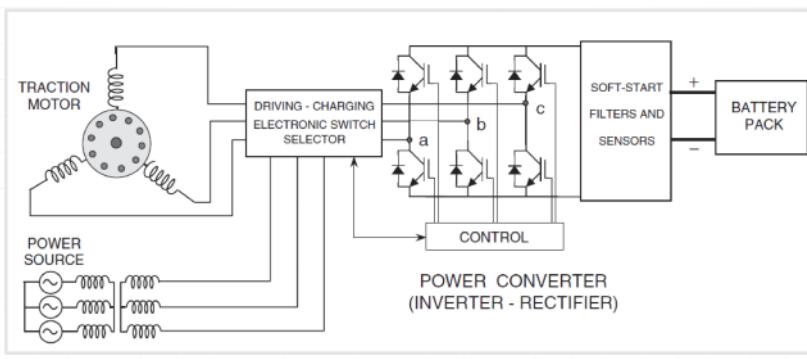
62



- łączenie różnych częstotliwości - bufor między sieciami 50Hz i 60Hz, np. bateria kondensatorów i dwa przekształtniki (prostownik-falownik)
- jeden przekształtnik: sterowanie napięciem, drugi: sterowanie mocą

Układy sterowania prostowników

Zastosowanie prostowników – system elektryczny autobusu



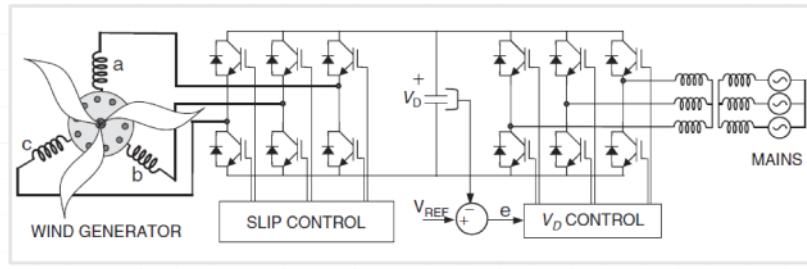
- możliwość ładowania baterii w silniku
- możliwość zasilania silnika z baterii

63



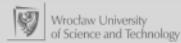
Układy sterowania prostowników

Zastosowanie prostowników – generator wiatrowy



- energia odnawialna o różnej częstotliwości - sygnały są prostowane, potem mamy już falownik i oddajemy napięcie do sieci

64



Dziękuję za uwagę!

65

