



Politechnika
Śląska



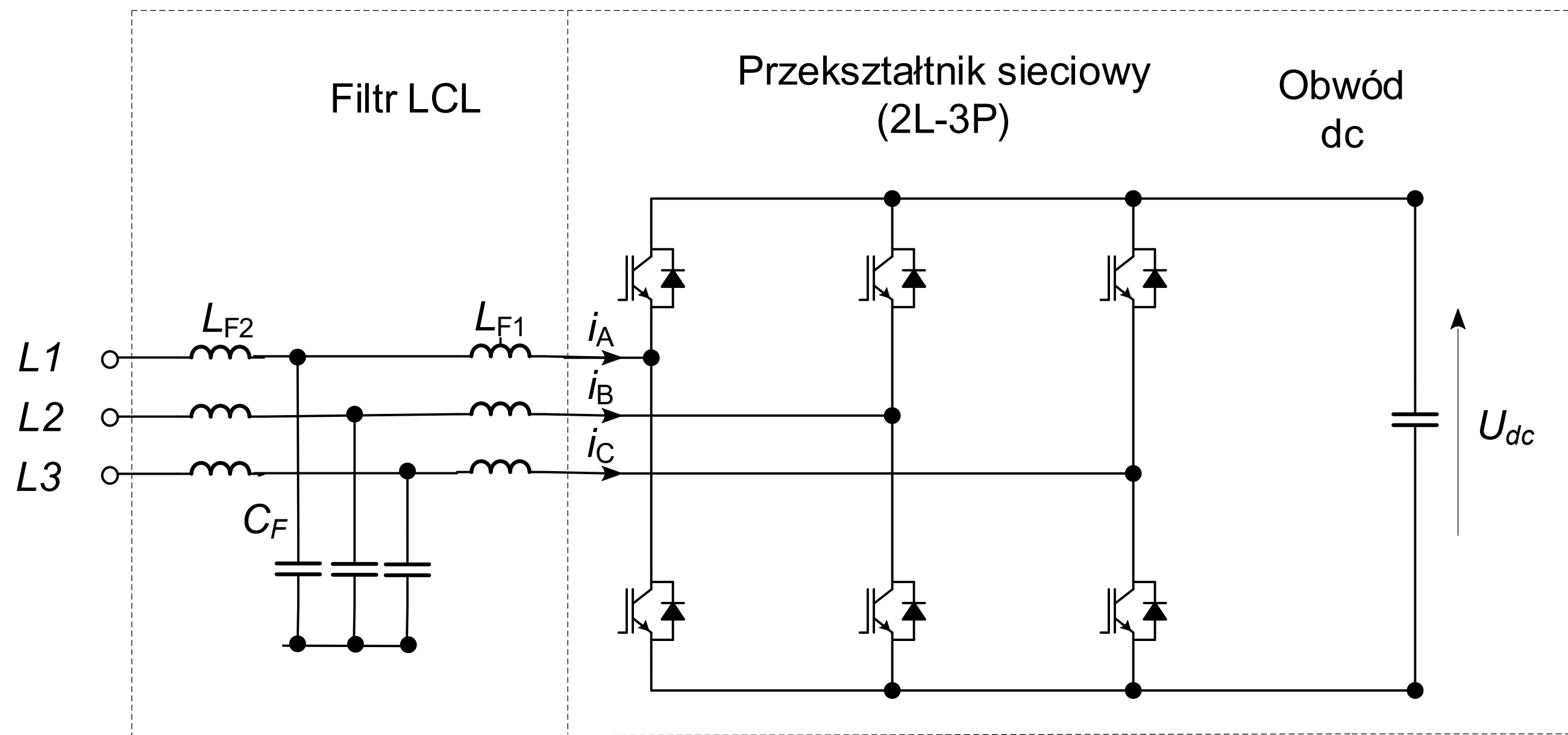
UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Realizacja wybranych funkcji NC RfG w przekształtnikach energoelektronicznych



dr inż. Jarosław Michalak
Politechnika Śląska
ENEL-PC Sp. z o.o.

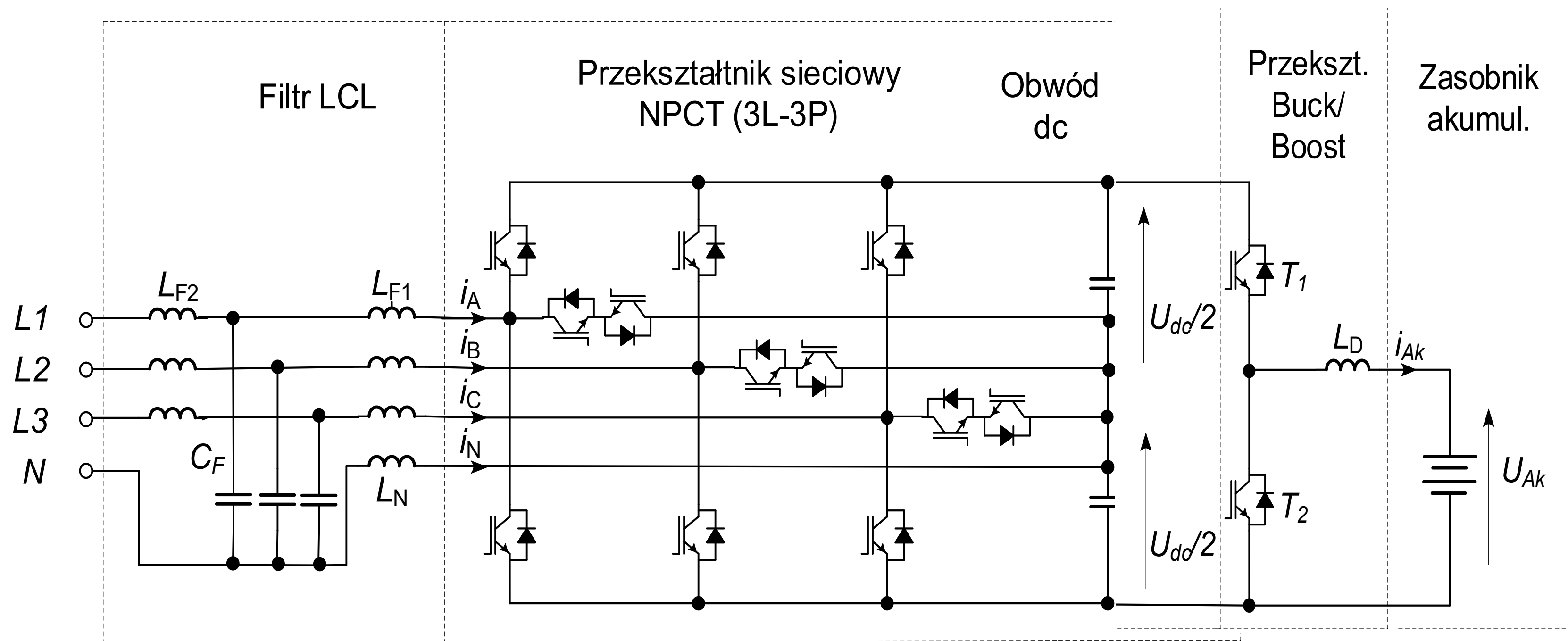
Rozwiązania przekształtników dla OZE



- Rozwiązanie dwupoziomowe, najmniejsza liczba tranzystorów, relatywnie duże wartości elementów filtra LCL, problemy związane z napięciem CM
- Sterowanie symetryczne w każdej z faz, dla pracy wyspowej wymagany transformator dY, transformatory stosowane również w przypadku współpracy z magazynem energii

- Praca ONGRID – generacja zadanej mocy czynnej/biernej na zaciskach przekształtnika. Praca w pętli regulacji prądu. Brak możliwości symetryzacji prądów.
- Praca OFFGRID – zasilanie odbiorników, generacja napięć 3x400 V, możliwość zasilania odbiorników niesymetrycznych jedynie przez transformator. Praca w pętli regulacji napięcia
- Przekształtnik współpracujący z OZE jest typu BOOST – podnoszący napięcie

Rozwiązania przekształtników dla OZE



- **Rozwiązanie NPC-T (T-type) trójpoziomowe, sprawność potencjalnie wyższa niż rozwiązania dwupoziomowego, filtr LCL o mniejszych wartościach elementów pasywnych, zredukowane problemy z napięciem CM, bardziej rozbudowany układ i bardziej skomplikowane sterowanie.**

- **Praca ONGRID – generacja zadanej mocy czynnej/biernej na zaciskach przekształtnika lub na przyłączy 400 V dla każdej z faz niezależnie. Możliwość symetryzacji. Praca w pętli regulacji prądu**
- **Praca OFFGRID – zasilanie odbiorników, generacja napięć 3x400 V, możliwość zasilania odbiorników niesymetrycznych. Praca w pętli regulacji napięcia**
- **Przy współpracy z OZE głównie praca symetryczna, niesymetryczna dla magazynów energii.**

Rola przekształtnika DC/AC

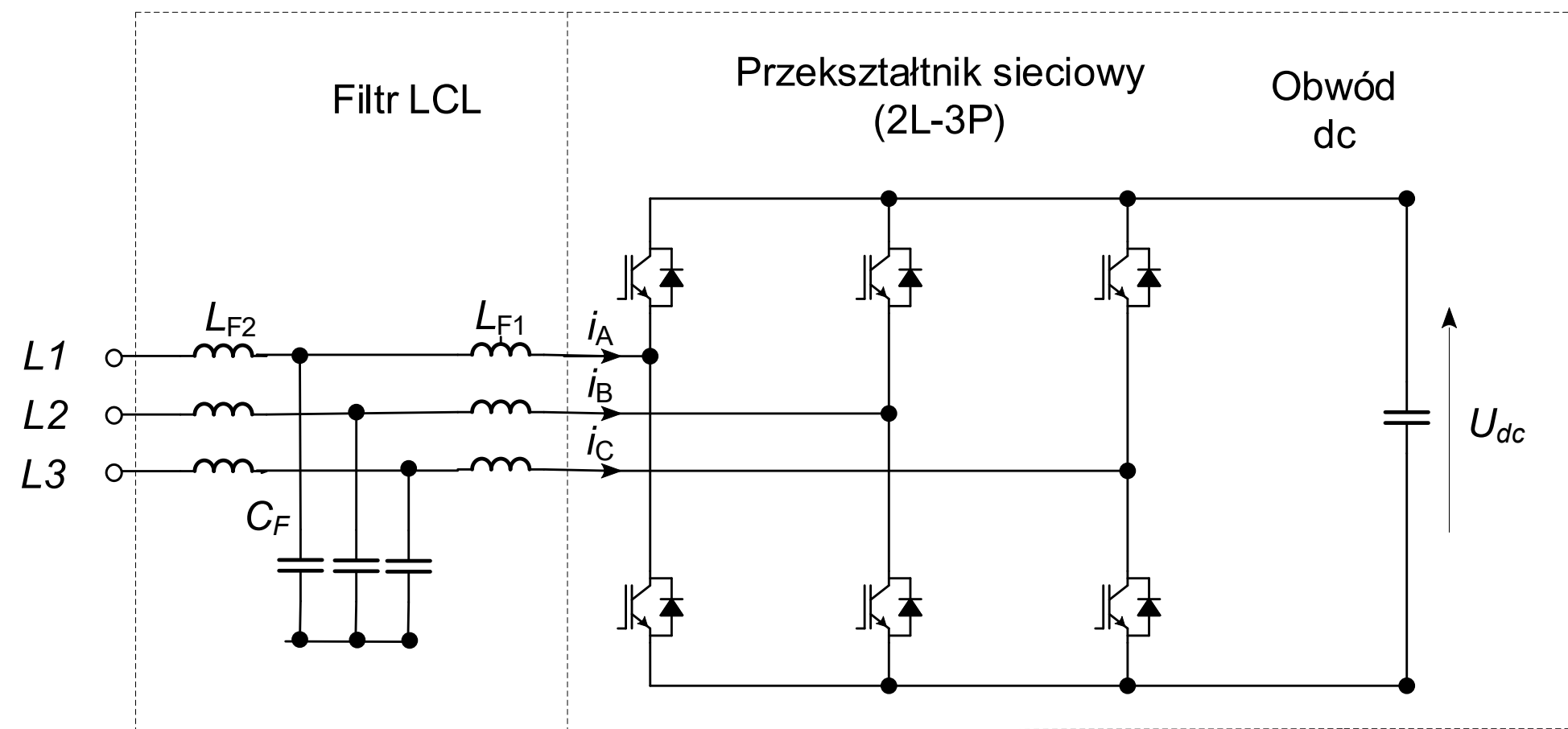
Źródło OZE wraz z przekształtnikiem znajdującym moc maksymalną modelują się jako źródło prądowe w zmiennej wydajności



Podstawowa rola przekształtnika DC/AC:

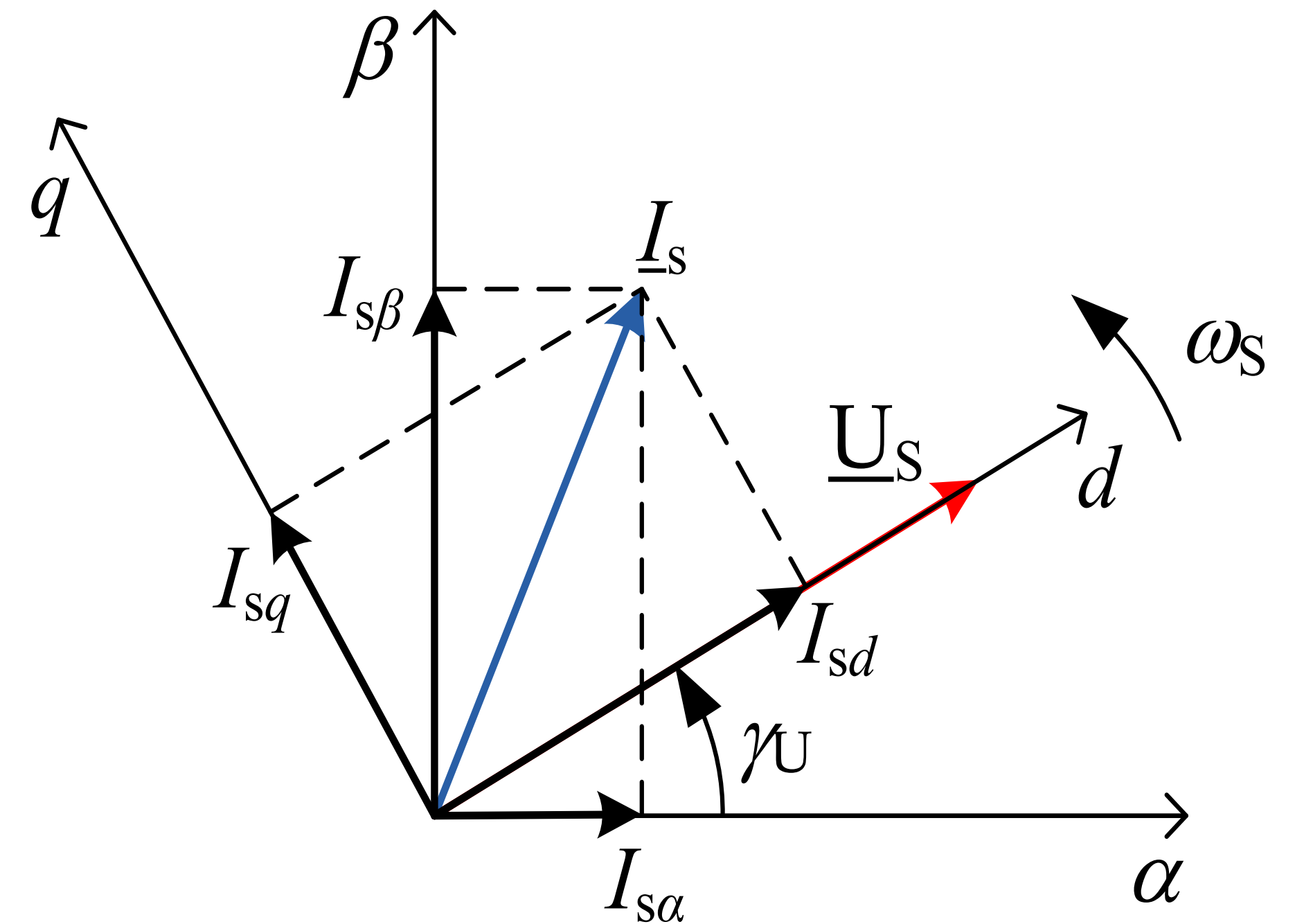
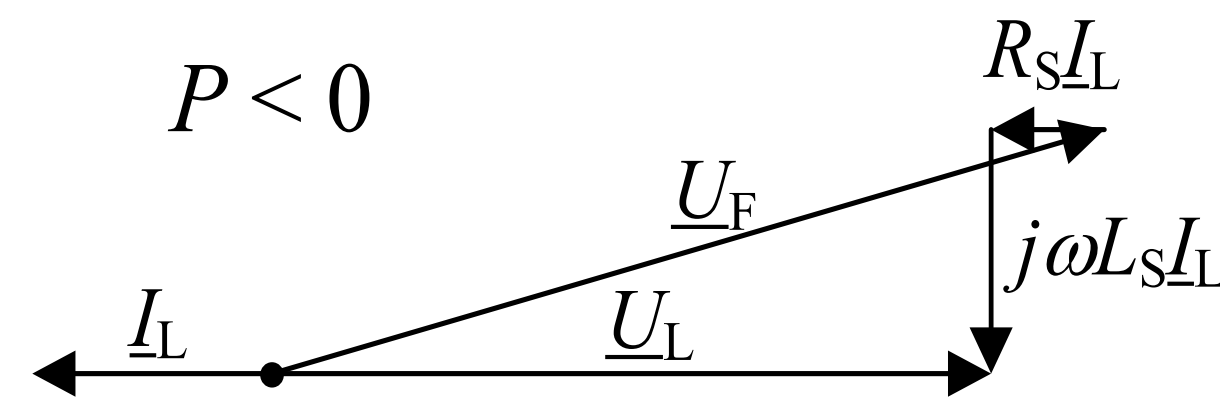
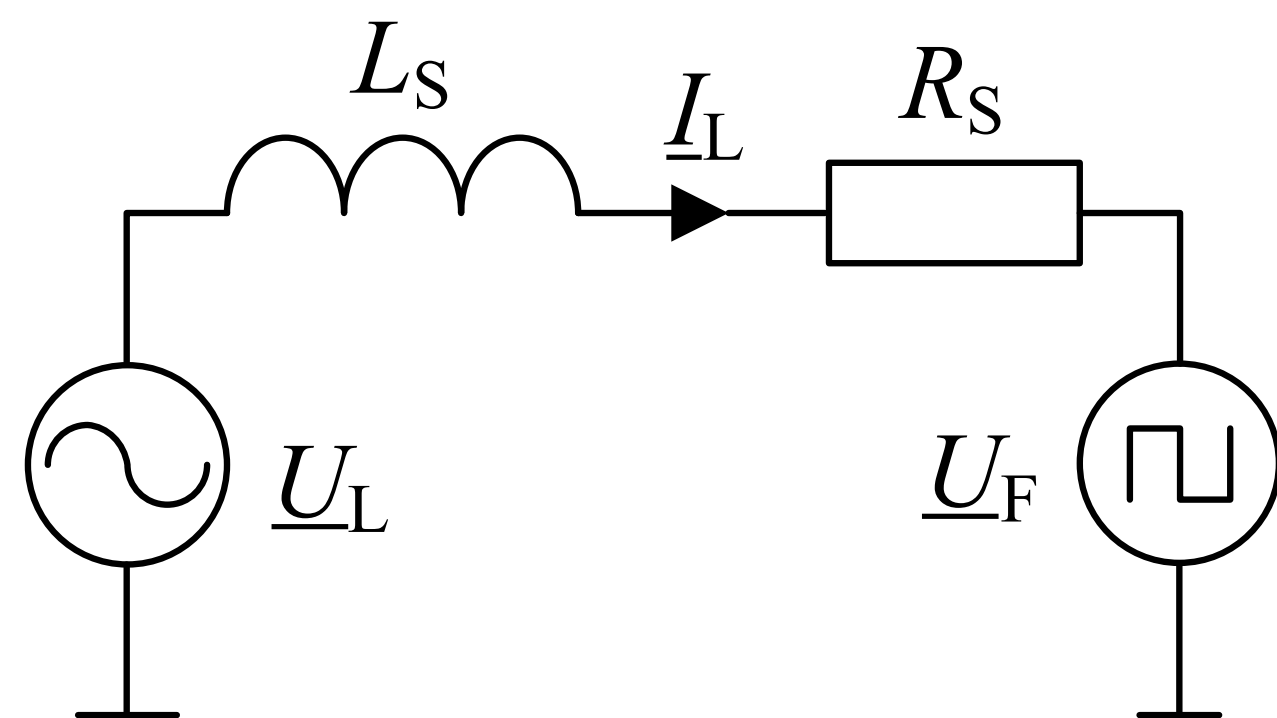
- Współpraca z siecią: bilansowanie mocy w obwodzie DC (bez informacji o mocy ze źródła OZE), co uzyskuje się poprzez utrzymywanie stałego napięcia obwodu pośredniczącego
- Praca wyspowa: utrzymywanie zadanej wartości skutecznej i częstotliwości napięcia odbiorników (Za bilans mocy musi odpowiadać inny przekształtnik)
- Przekształtniki DC/AC są dwukierunkowe

Działanie przekształtnika DC/AC



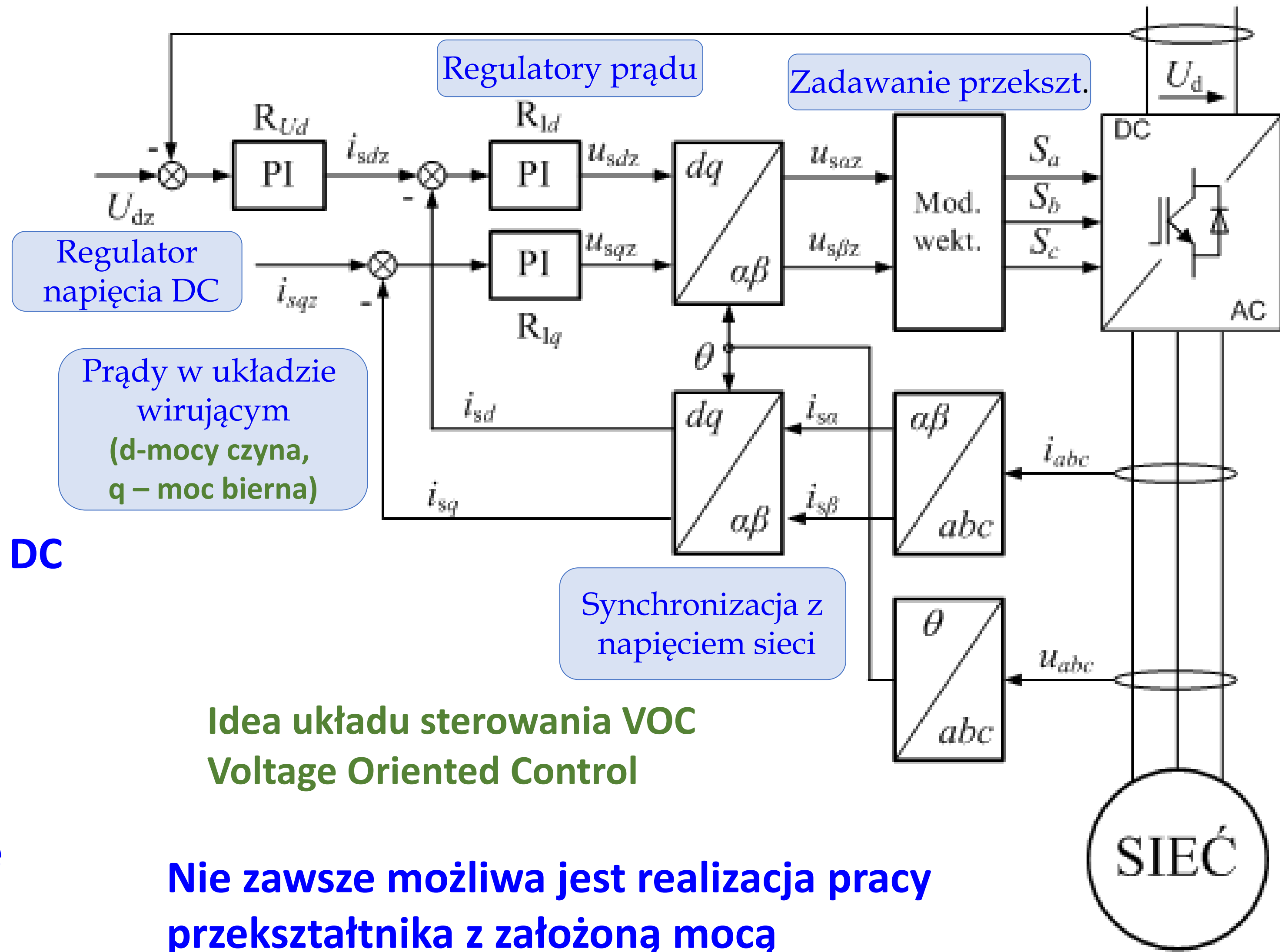
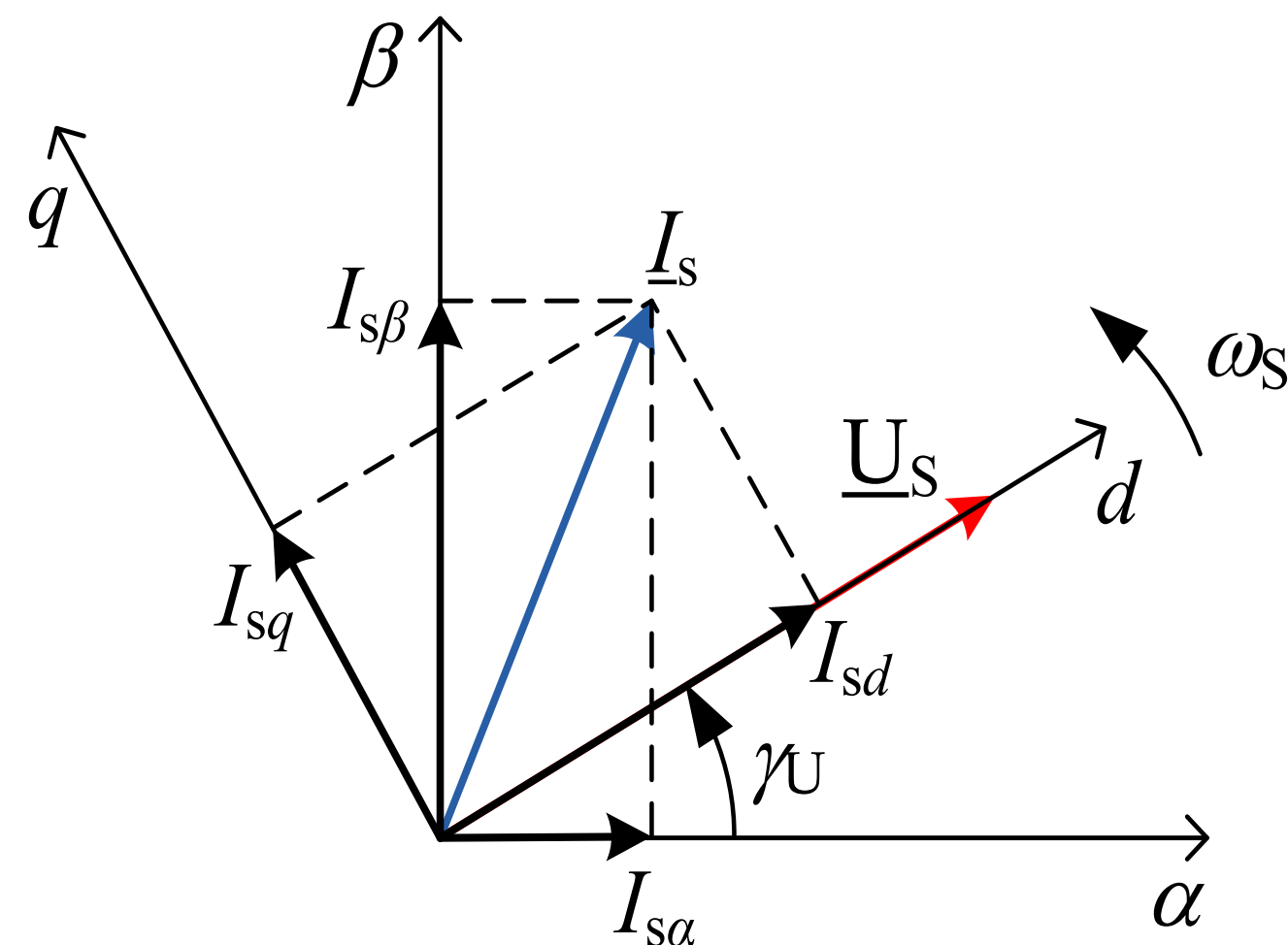
Filtr wejściowy L / LCL jest niezbędny do pracy przekształtnika i służy do ograniczania zmian prądu. Filtr LCL charakteryzuje się lepszym tłumieniem

Schemat zastępczy



W przekształtniku proces regulacji odbywa się w się wirujący układzie odniesienia d,q zorientowanym względem wektora przestrzennego napięcia sieci lub wirtualnego strumienia sieci

Układ regulacji przekształtnika DC/AC



W przypadku źródeł OZE – stabilizacja napięcia DC (decydującej o mocy czynnej).

W przypadku magazynów energii – realizacja zadanej mocy czynnej i biernej.

Wymagana synchronizacja z napięciem sieci.

Praca przekształtnika jak trójfazowe sterowane źródło prądu – grid-following (GFL) converters.

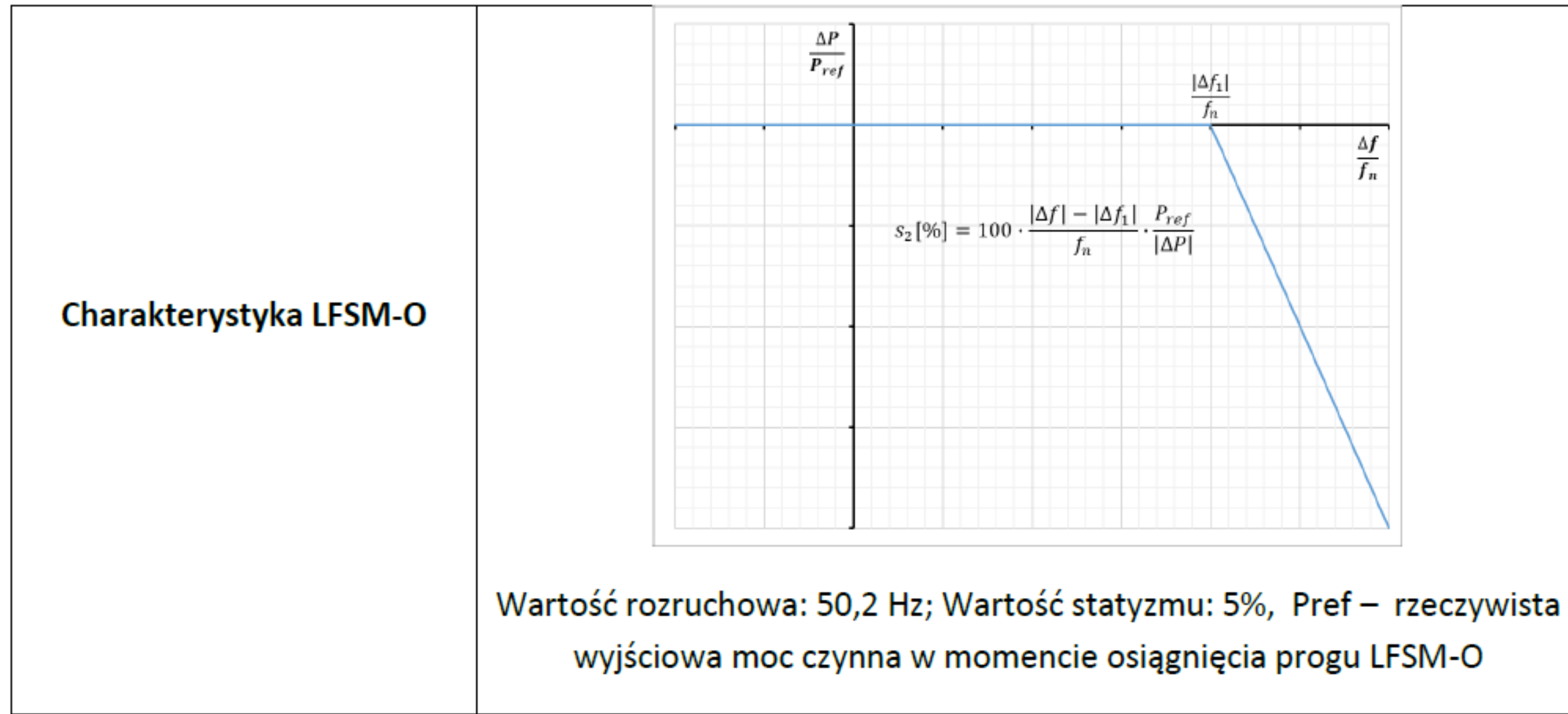
Idea układu sterowania VOC
Voltage Oriented Control

Nie zawsze możliwa jest realizacja pracy przekształtnika z założoną mocą

Wpływ na pracę przekształtników wynikający z NC RfG

Kodeks sieci NC RfG (Network Codes Requirements for Generators) określa wymagania jakie muszą spełniać jednostki wytwórcze przyłączane do sieci (zgodnie z Rozporządzeniem Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r.)

W dalszej części skupiono się na wybranych wymaganiach przedstawionych w dokumencie „Bank Nastaw dla Polski” (<https://ptpiree.pl/kodeksy-sieci/warunki-i-procedury/>)



Źródło: „Bank Nastaw dla Polski”

LFSM-O (Limited Frequency Sensitive Mode – Overfrequency) polega na automatycznej redukcji mocy czynnej przy wzroście częstotliwości

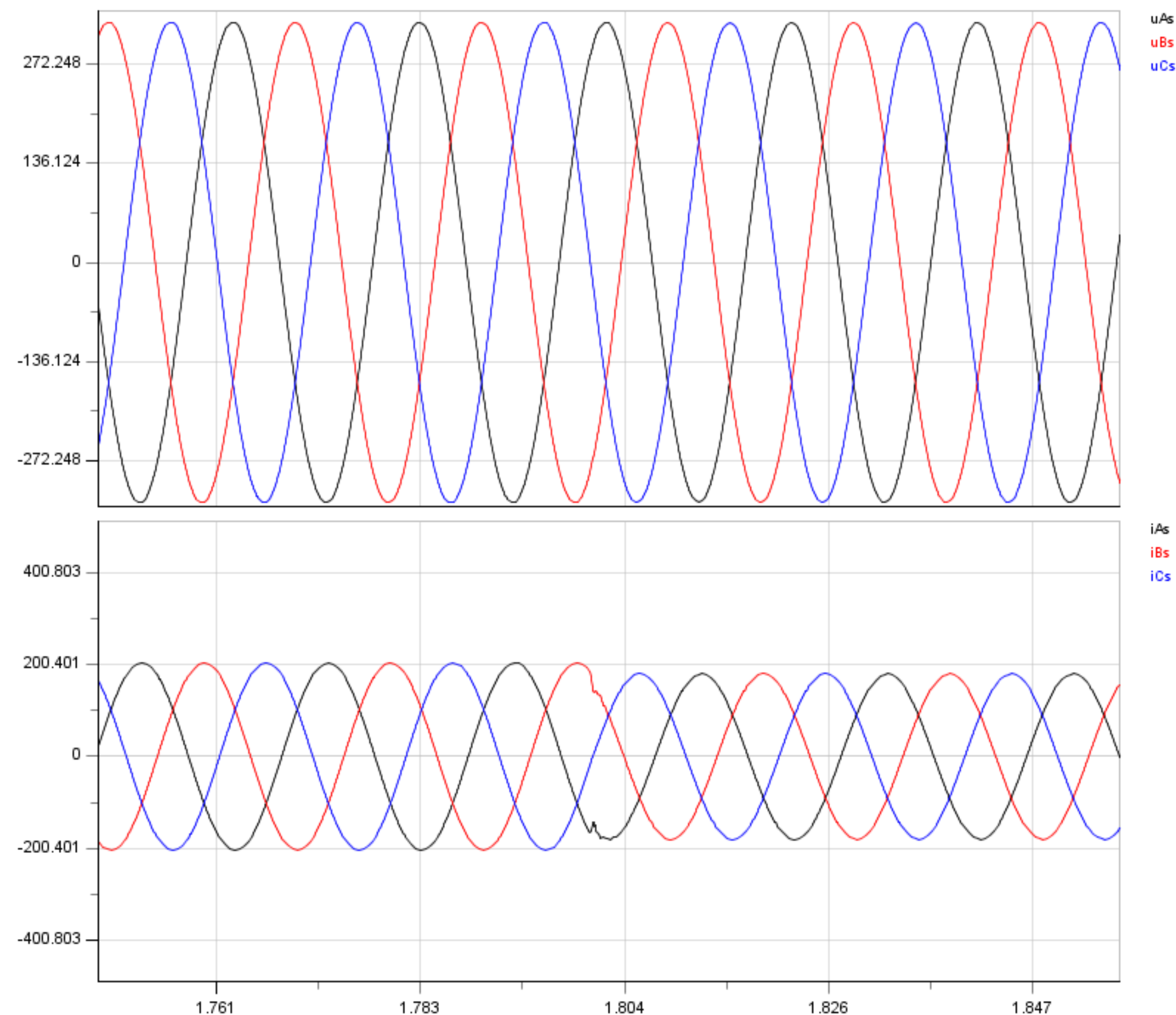
Inne tryby pracy związane z częstotliwością:
LFSM-U (Limited Frequency Sensitive Mode – Underfrequency)

FSM - (Frequency Sensitive Mode)

Realizacja trybu LFSM-O w przekształtniku DC/AC

W przekształtniku w czasie rzeczywistym wyznaczana jest częstotliwość napięcia sieci, po przekroczeniu wartości rozruchowej zatrzymywana moc generowana i wraz ze wzrostem częstotliwości jest ona zmniejszana (dla statyzmu 5% zmiana mocy wynosi 40% na 1 Hz).

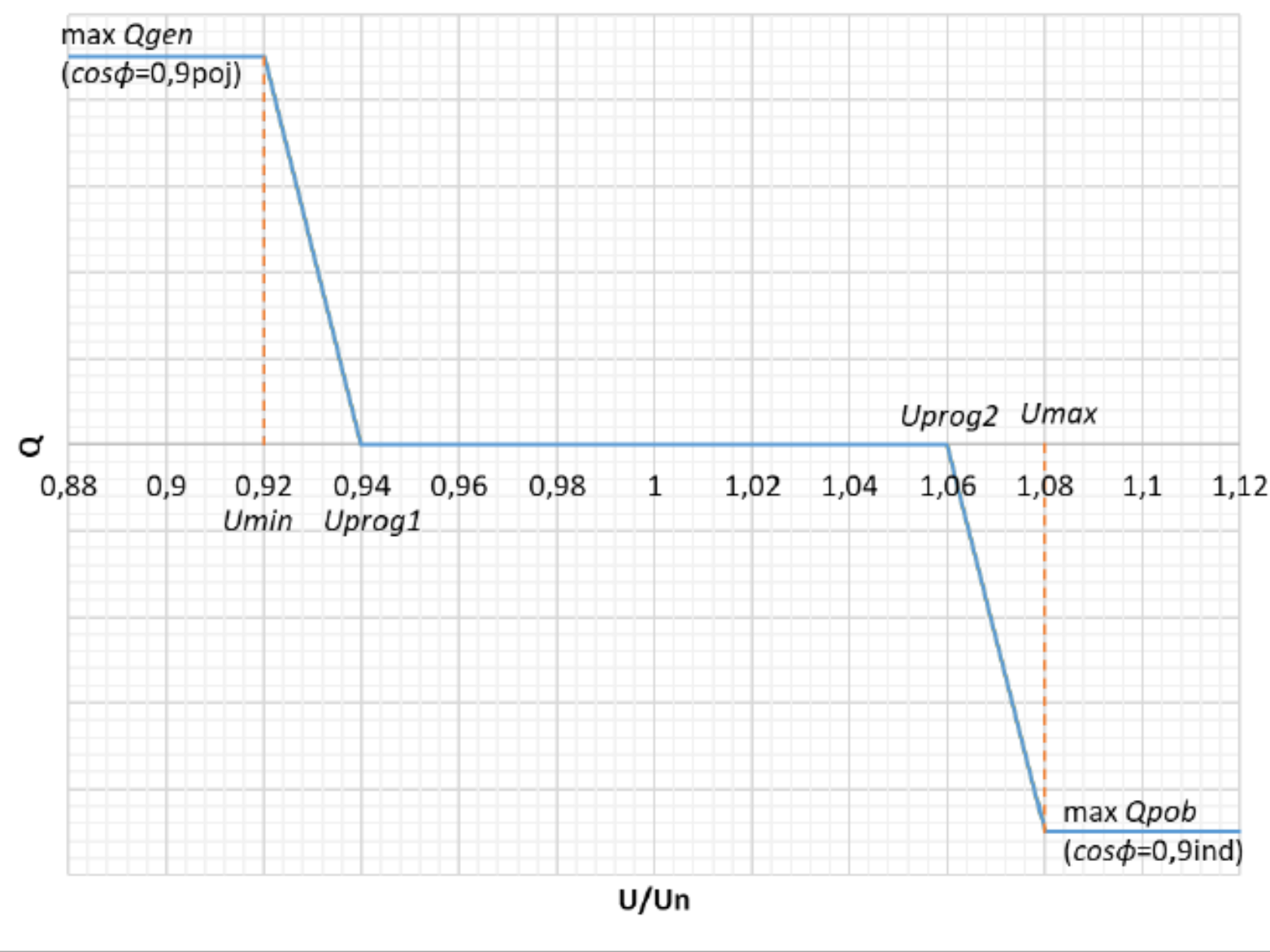
W przekształtniku realizowane jest to poprzez wpływanie na n jest dostosowanie punktu pracy źródła OZE. Realizacja relatyw



Sterowanie mocą bierną

Moduły wytwarzania typu A

Charakterystyka sterowania mocą bierną w funkcji napięcia na zaciskach generatora (tryb Q(U))

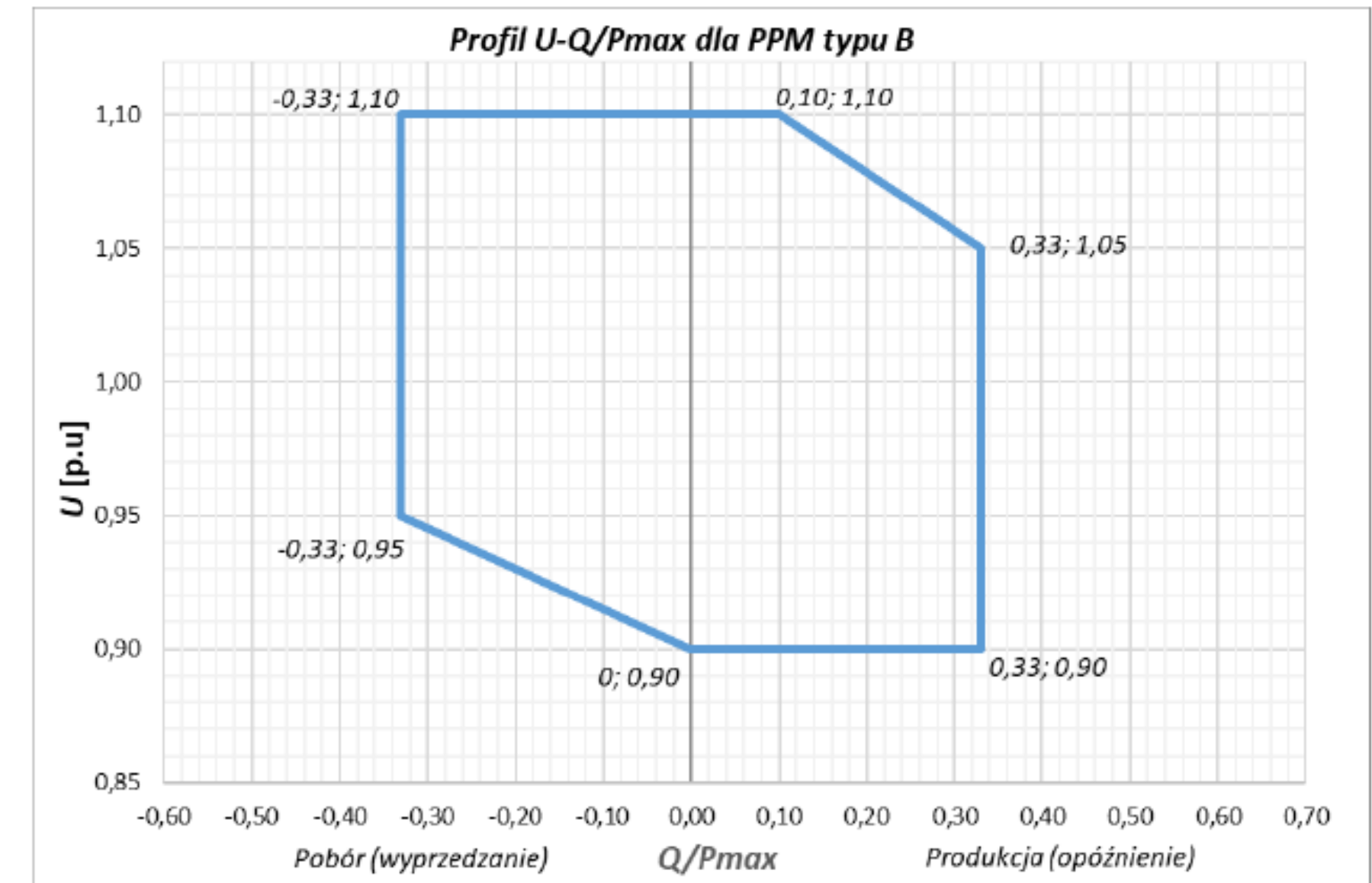


Punkty na charakterystyce: $\max Q_{pob} = -0,4843P_D$ (odpowiada $\cos \phi = 0,9_{ind}$); $\max Q_{gen} = 0,4843P_D$ (odpowiada $\cos \phi = 0,9_{poj}$); $U_{prog1} = 0,94U$ p.u.; $U_{prog2} = 1,06 U$ p.u. $U_{min} = 0,92 U$ p.u.; $U_{max} = 1,08U$ p.u.; statyzm = 2,222, gdzie P_D - projektowana moc czynna

Moduły wytwarzania typu B

Wymagania minimalne regulacji mocy biernej przedstawione na profilu U-Q/Pmax, gdzie U-Q/Pmax – wartość względna napięcia w zakresie zmian mocy biernej (Q) w stosunku do mocy maksymalnej (Pmax).

Charakterystyka sterowania mocą bierną w funkcji napięcia w punkcie przyłączenia
Charakterystyka U-Q/Pmax



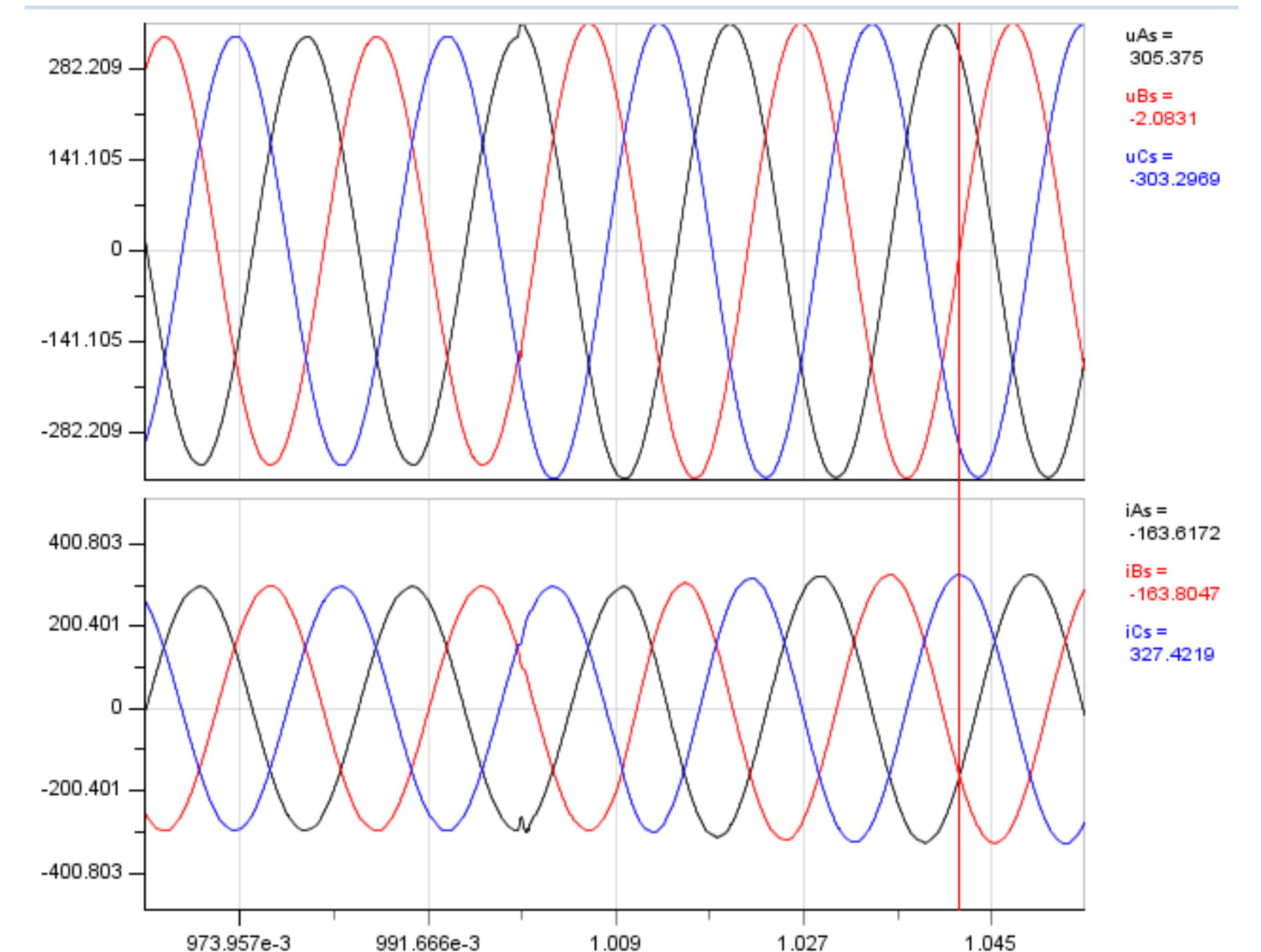
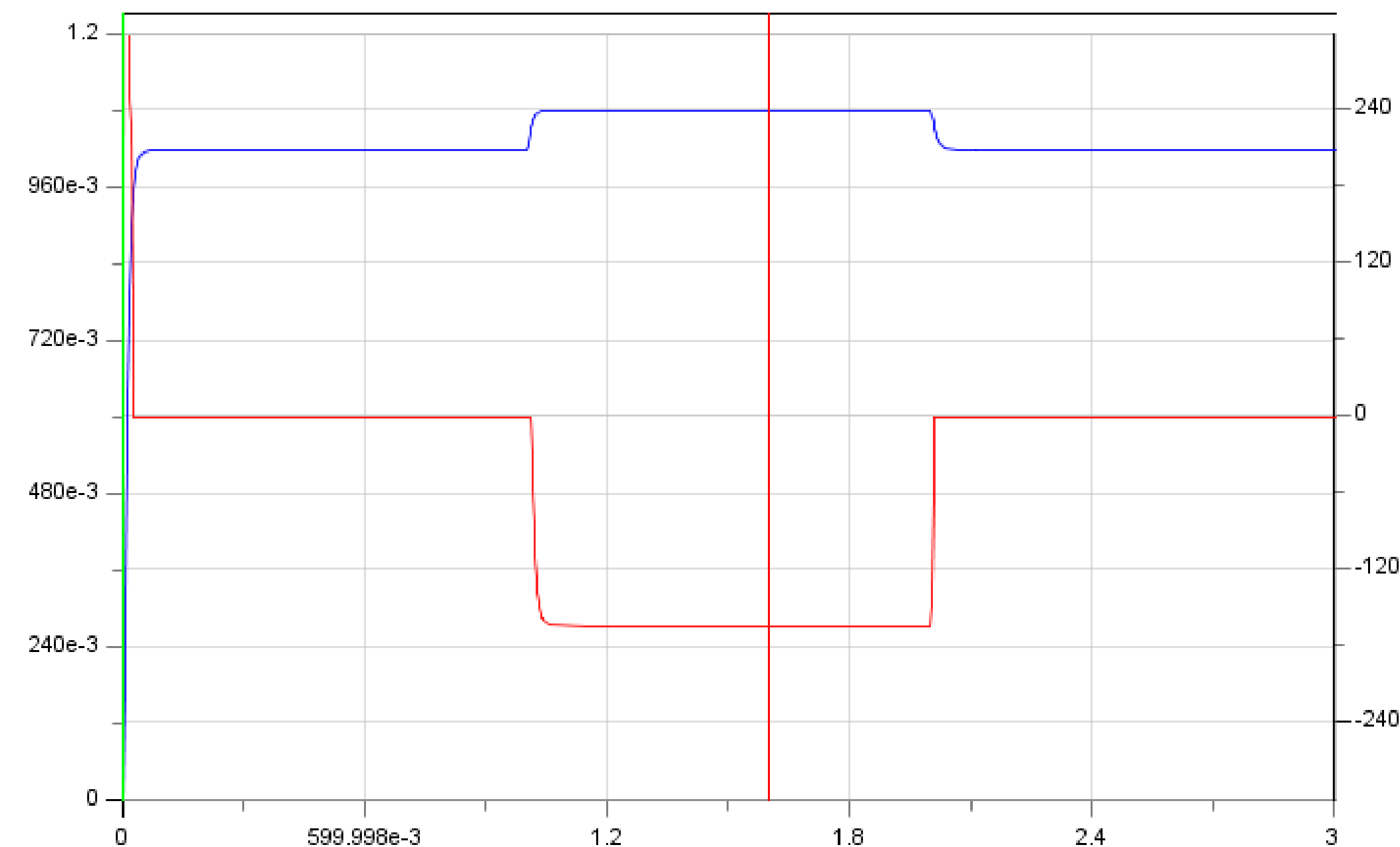
Źródło: „Bank Nastaw dla Polski”

Realizacja sterowania mocą bierną w przekształtniku DC/AC

W przekształtniku w czasie rzeczywistym określana jest względna amplituda napięcia sieci w punkcie przyłączenia i wartość zadanej mocy biernej zależy od aktualnie generowanej mocy czynnej i wartości napięcia sieci. Dla rozwiązań z niezależną regulacją dla każdej z faz możliwa jest niezależna generacja mocy biernej – pośrednia symetryzacja napięć.

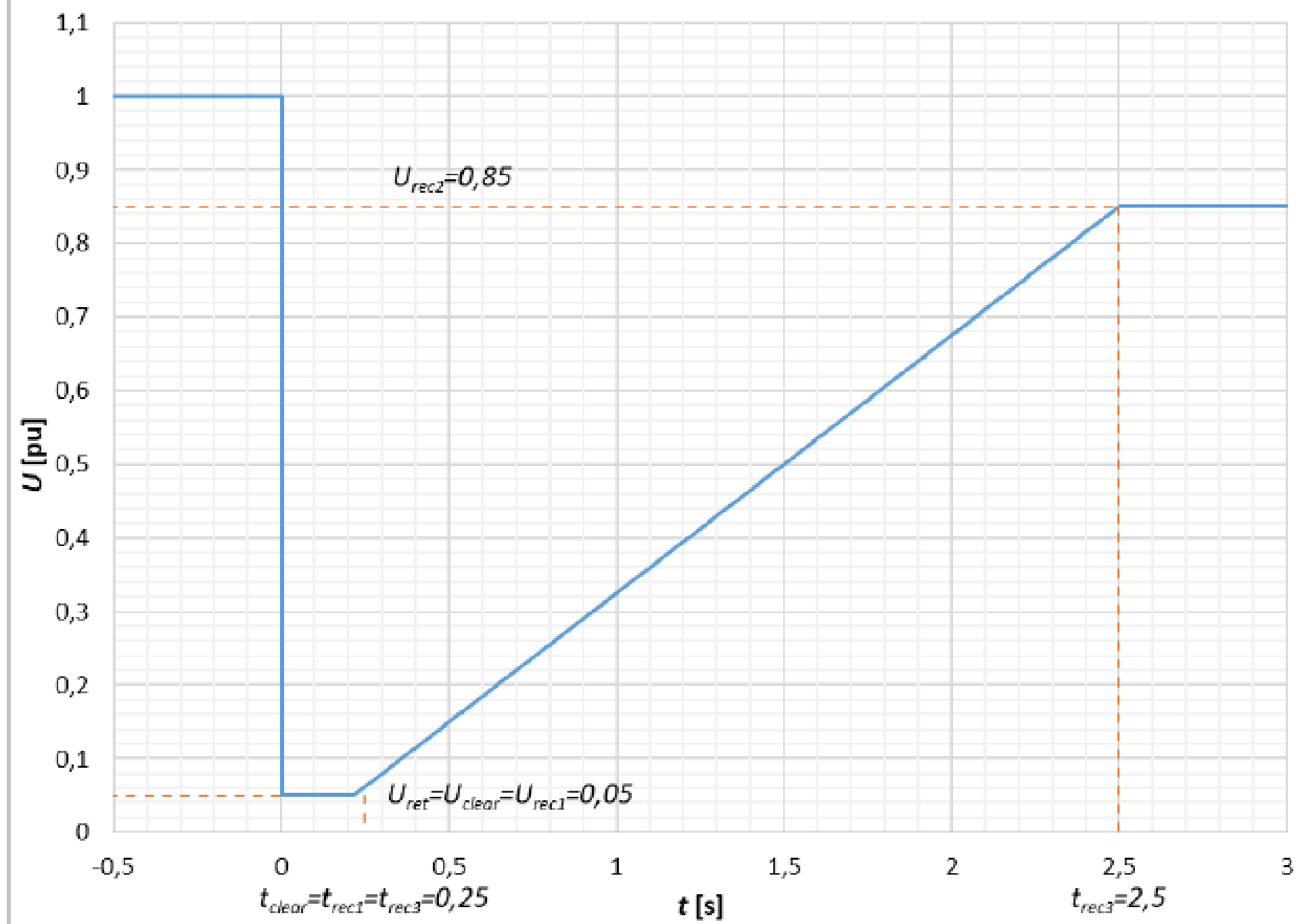
Dla jednostek typu B – port komunikacyjny do zadawania mocy biernej/ współczynnika mocy)

W przekształtniku realizowane jest to poprzez wpływanie na zadaną moc bierną, do napięcia 108% U_N nie wpływa na generację mocy czynnej. Realizacja relatywnie prosta.



Pozostawanie w pracy podczas zwarcia

Charakterystyka FRT (ang. Fault Ride Through) - profil pozostawania w pracy podczas zwarcia dla modułu wytwarzania energii



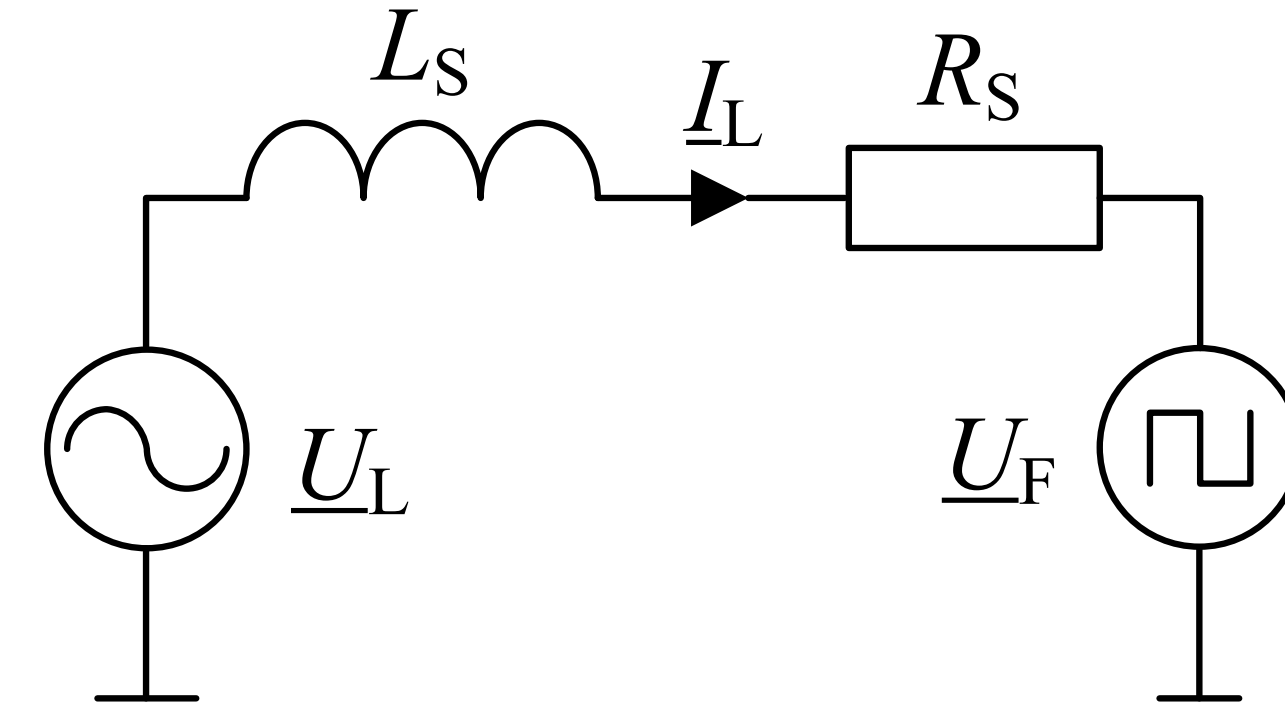
Parametry napięcia [pu]		Parametry czasu [s]	
U_{ret}	0,05	t_{clear}	0,25
U_{clear}	0,05	t_{rec1}	0,25
U_{rec1}	0,05	t_{rec2}	0,25
U_{rec2}	0,85	t_{rec3}	2,50

Wymaganie dla modułów wytwarzania typu B.
W czasie zwarcia brak możliwości przekazywania mocy czynnej ze źródła. Po zakończeniu zwarcia pozakłóceniowe odtworzenie mocy czynnej w czasie do 5 sekund, napięcie powyżej 90% U_N

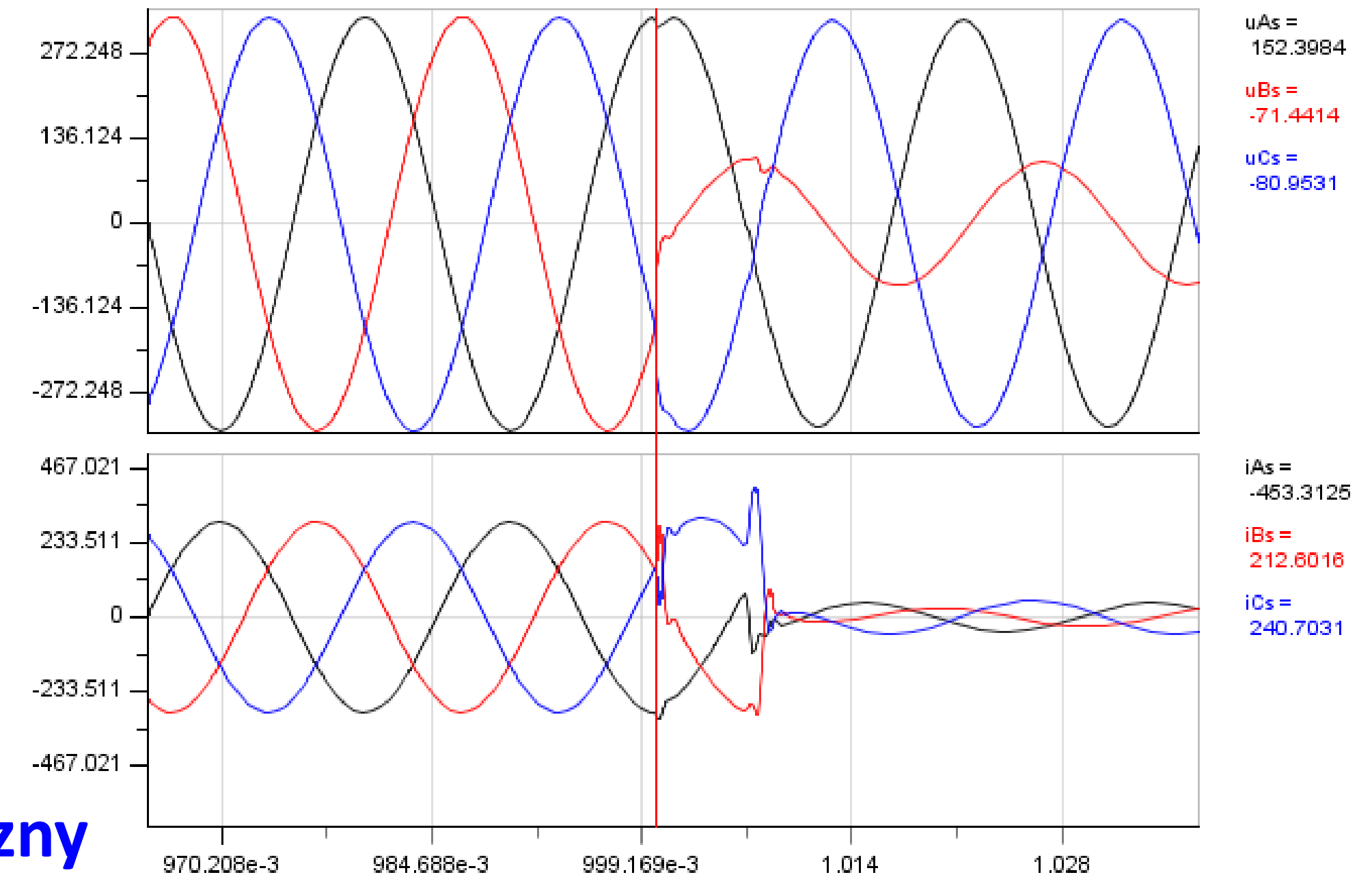
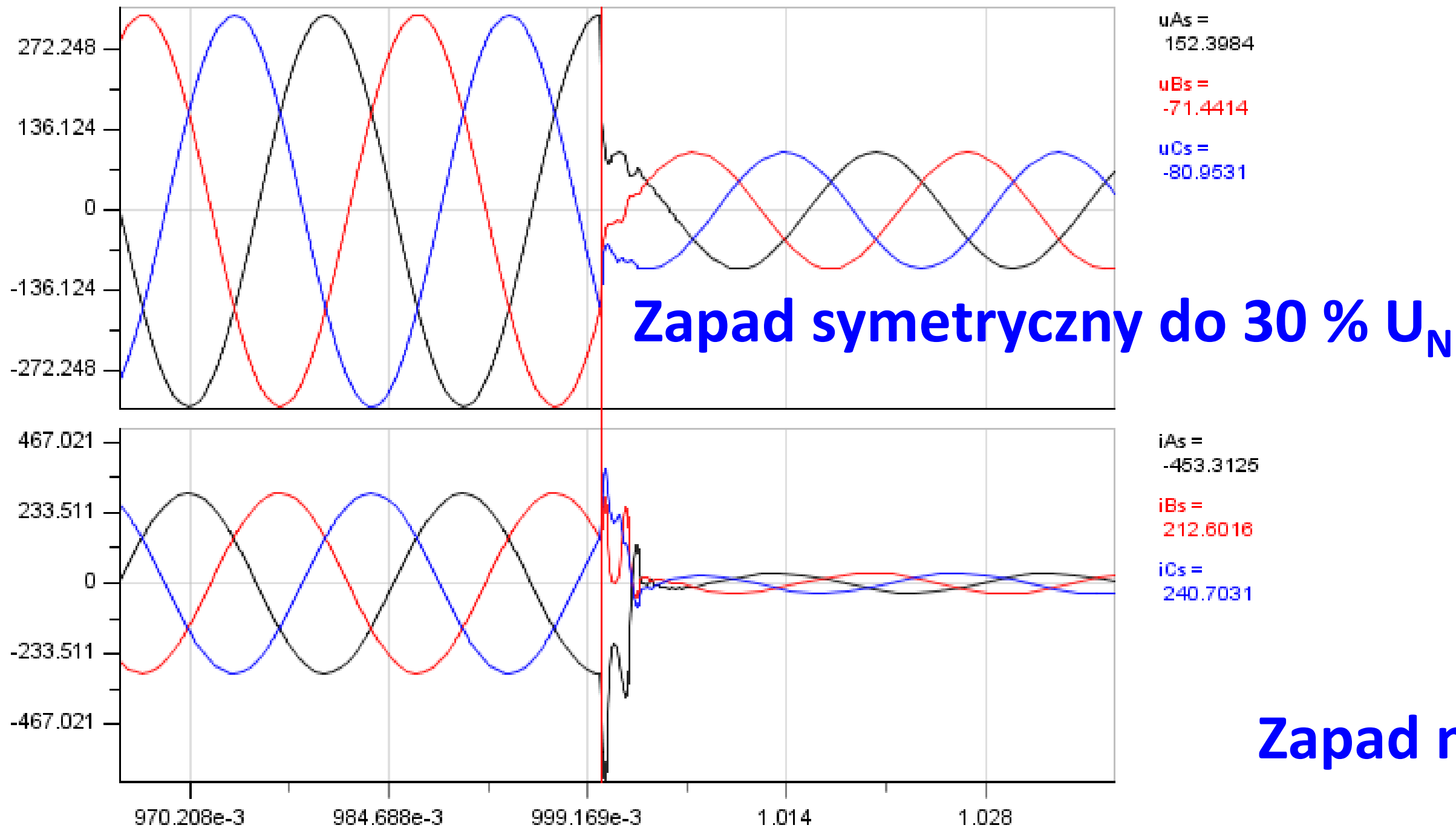
Źródło: „Bank Nastaw dla Polski”

Realizacja FRT w przekształtniku DC/AC

W przekształtniku mierzona jest wartość napięcia w czasie rzeczywistym i w chwili zwarcia przekształtnik dostosowuje się do niej aby utrzymać zadaną lub zredukowaną wartość prądu (redukcja aby umożliwić generację prądu biernego). Wymagana szybka reakcja przekształtnika i dokładny pomiar wartości chwilowej napięcia sieci. Czas trwania zapadu ma mniejsze znaczenie



W przekształtniku realizowane jest to poprzez szybką redukcję wypełnienia przy zachowaniu sterowalności.



Generacja szybkiego prądu zwarcowego

Wymaganie dla modułów wytwarzania typu B.

W przypadku wystąpienia zwarć poza instalacją wewnętrzną PPM, moduł wytwarzania energii powinien posiadać zdolność do generacji dodatkowego prądu biernego.

3. Dla zwarć symetrycznych wsparcie prądem biernym powinno być:

- proporcjonalne do zmiany składowej zgodnej napięcia w punkcie przyłączenia ΔU_1 spowodowanej zakłóceniem (wartością odniesienia jest wartość średnia składowej zgodnej napięcia za okres 1 minuty sprzed zakłócenia \bar{U}_1),
- proporcjonalne do wartości współczynnika wzmocnienia K_1 ,
- blokowane, gdy wartość składowej zgodnej napięcia jest większa niż wartość wyzwania U_{trig}

$$\Delta I_{Q1} = K_1 \cdot \Delta U_1, \text{ gdzie: } \Delta U_1 = \begin{cases} 0 & \text{dla } U_1 \geq U_{trig} \\ \frac{U_1 - \bar{U}_1}{U_n} & \text{dla } U_1 < U_{trig} \end{cases}$$

gdzie:

- $K_1 = 2$
- $U_{trig} = 0,85 U_n$

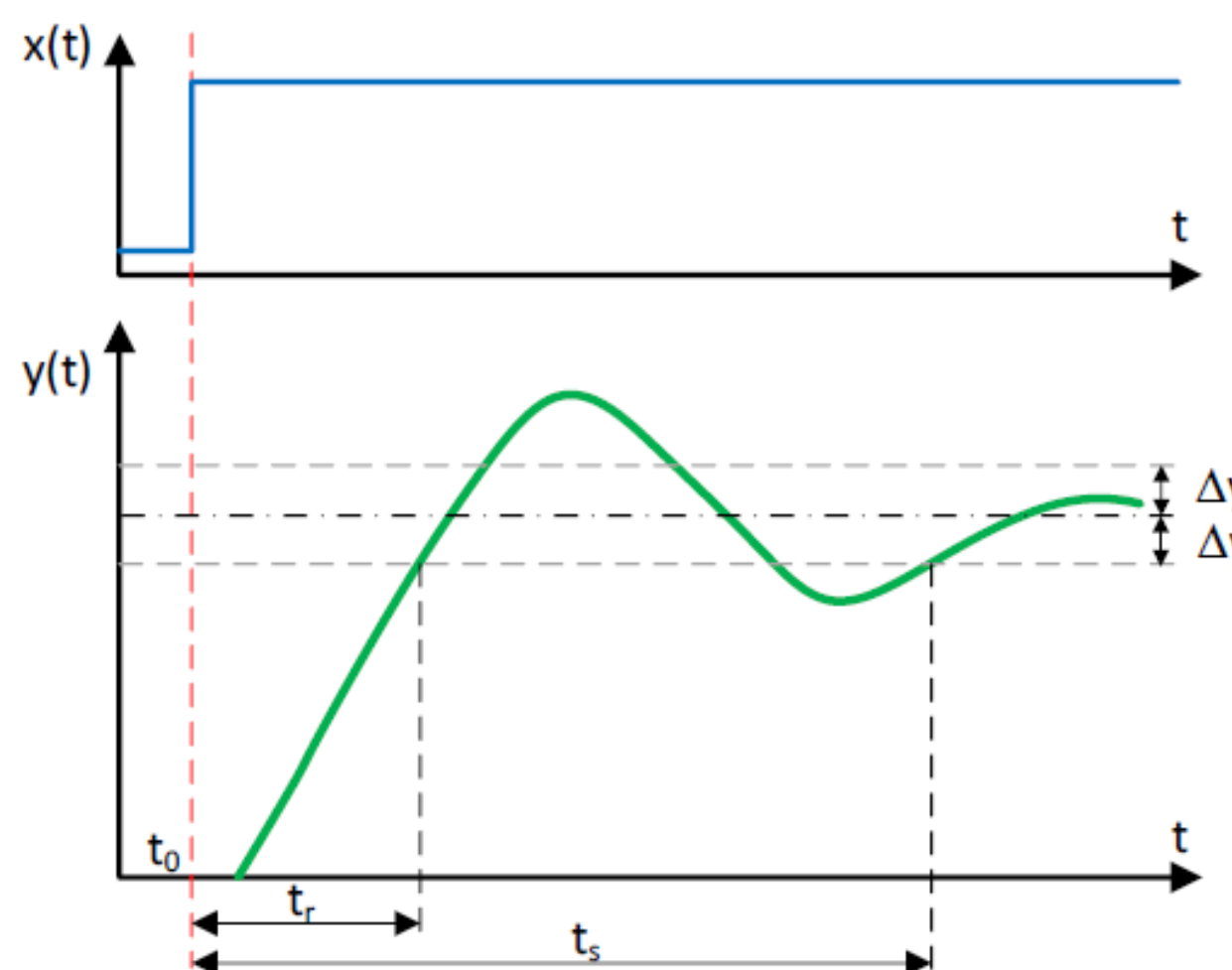
Wymagania dodatkowe:

- należy zapewnić możliwość zablokowania wsparcia odpowiedzi prądowej z PPM,
- w przypadku zwarć przy których jest wymagana zdolność do pozostania w pracy, pierwszeństwo w generacji ma prąd bierny,
- zdolność do generacji dodatkowego prądu biernego powinna być możliwa do osiągnięcia dopuszczalnego prądu fazowego (I_{max}).

Właściwości dynamiczne układu regulacji dodatkowym prądem biernym:

- czas odpowiedzi prądowej t_r na spadek napięcia – max. 30 ms,
- czas ustalania odpowiedzi prądowej t_s – max. 60 ms,
- dopuszczalna tolerancja odpowiedzi prądowej: od -10 % do +20%.

Interpretacja graficzna parametrów t_r i t_s w odpowiedzi $y(t)$ układu regulacji na skok jednostkowy:



Δy – dokładność układu regulacji.

4. Dla zwarć niesymetrycznych wsparcie prądem biernym powinno być zgodnie z zasadą superpozycji:

- składowej zgodnej dodatkowego prądu biernego, zgodnie z zasadami zdefiniowanymi dla zwarć symetrycznych,
- składowej przeciwnej dodatkowego prądu biernego, którego wartość jest proporcjonalna do zmiany składowej przeciwnej napięcia ΔU_2 (wartością odniesienia jest wartość średnia składowej przeciwnej napięcia za okres 1 minuty sprzed zakłócenia \bar{U}_2) i współczynnika wzmocnienia K_2 .

$$\Delta I_{Q2} = K_2 \cdot \Delta U_2, \text{ gdzie } \Delta U_2 = \frac{(U_2 - \bar{U}_2)}{U_n}$$

Dodatkowo:

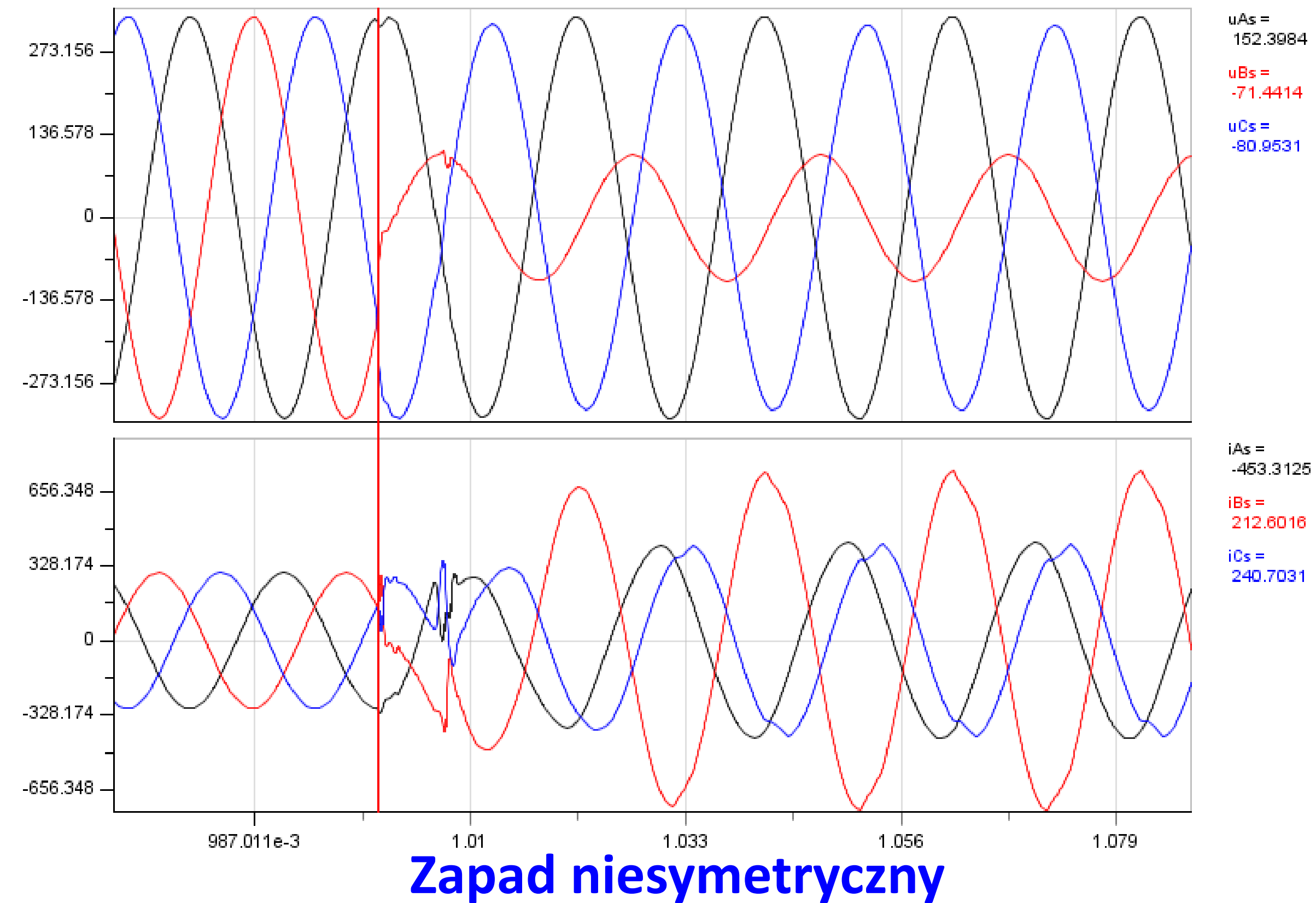
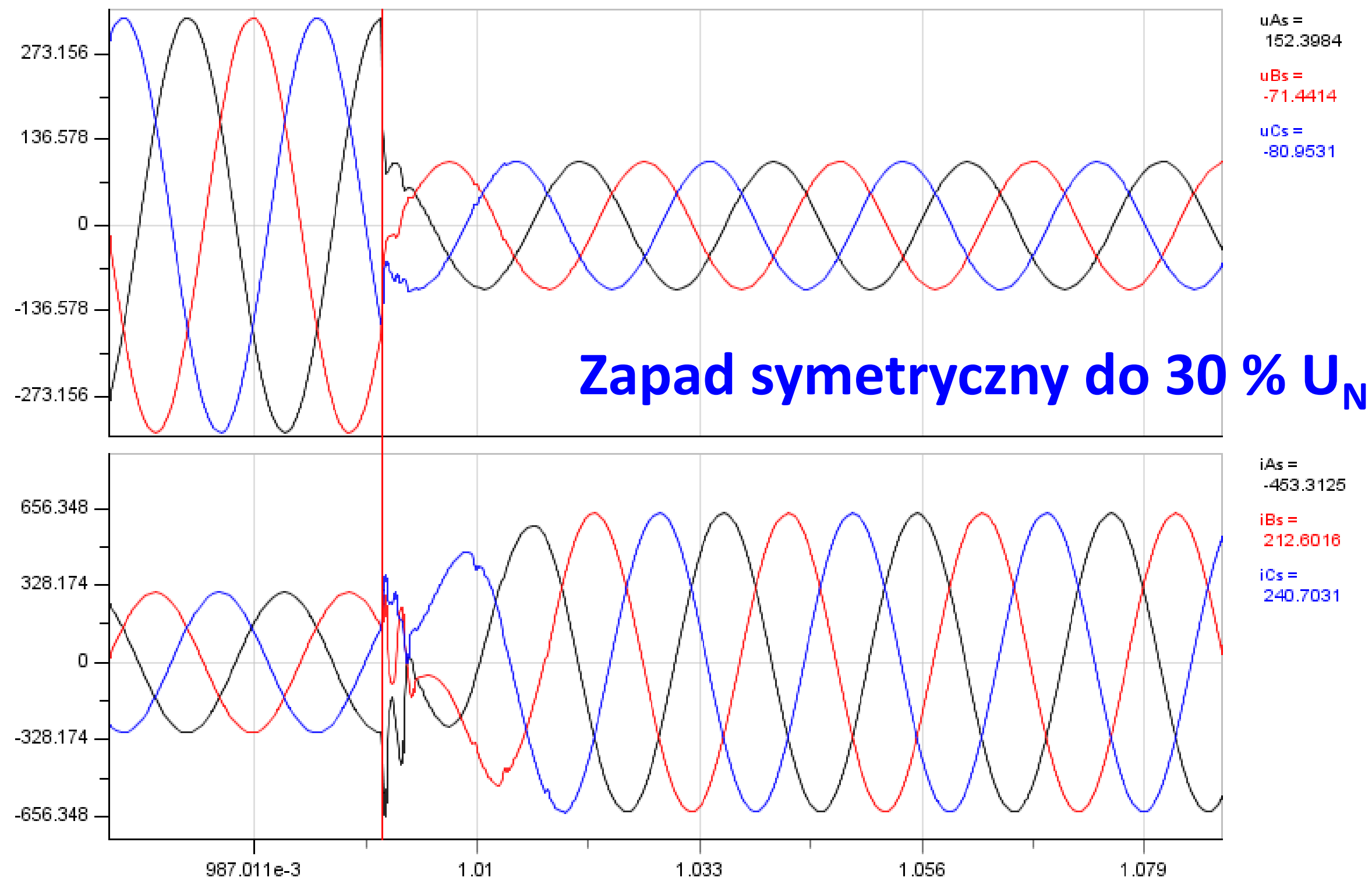
- $K_2 = 2$,
- prąd bierny ΔI_Q , będący sumą wektorów odpowiedzi składowej zgodnej i przeciwnej ($\Delta I_{Q1} + \Delta I_{Q2}$), nie powinien powodować przekroczenia dopuszczalnej wartości prądu fazowego w żadnej z faz,

właściwości dynamiczne odpowiedzi prądowej – jak dla zwarć symetrycznych.

Źródło: „Bank Nastaw dla Polski”

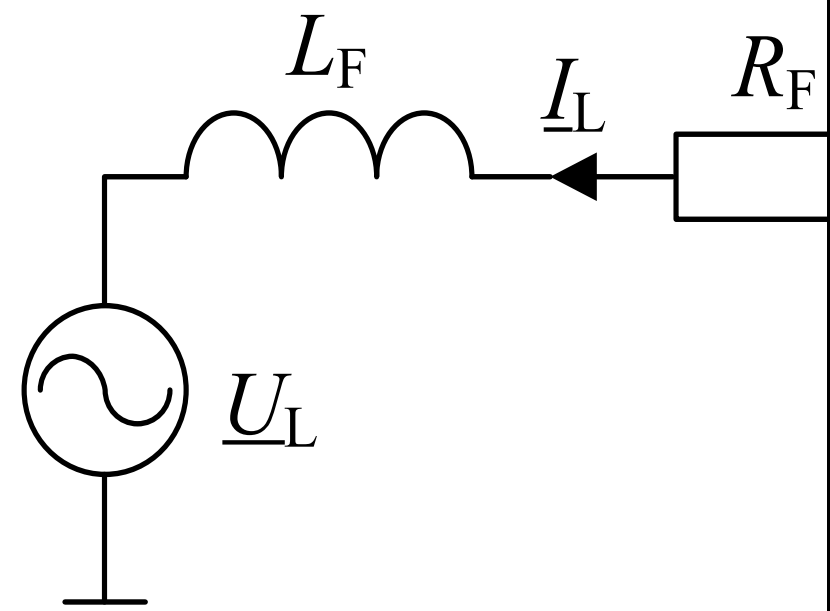
Realizacja generacji szybkiego prądu zwarcowego

Przekształtnik oprócz pomiaru napięcia sieci w czasie rzeczywistym i dostosowania się do niej (jak dla FRT) przeprowadza analizę składowych symetrycznych i generuje dodatkowy prąd bierny odpowiednio dla składowej zgodnej i przeciwnej. Dla przekształtników z niezależną kontrolą mocy w każdej fazie możliwa jest generacja prądu biernego dla każdej z faz niezależnie. O wartości maksymalnej prądu decyduje K oraz przeciążalność (co najmniej I_N , typowo $1,5 I_N$).



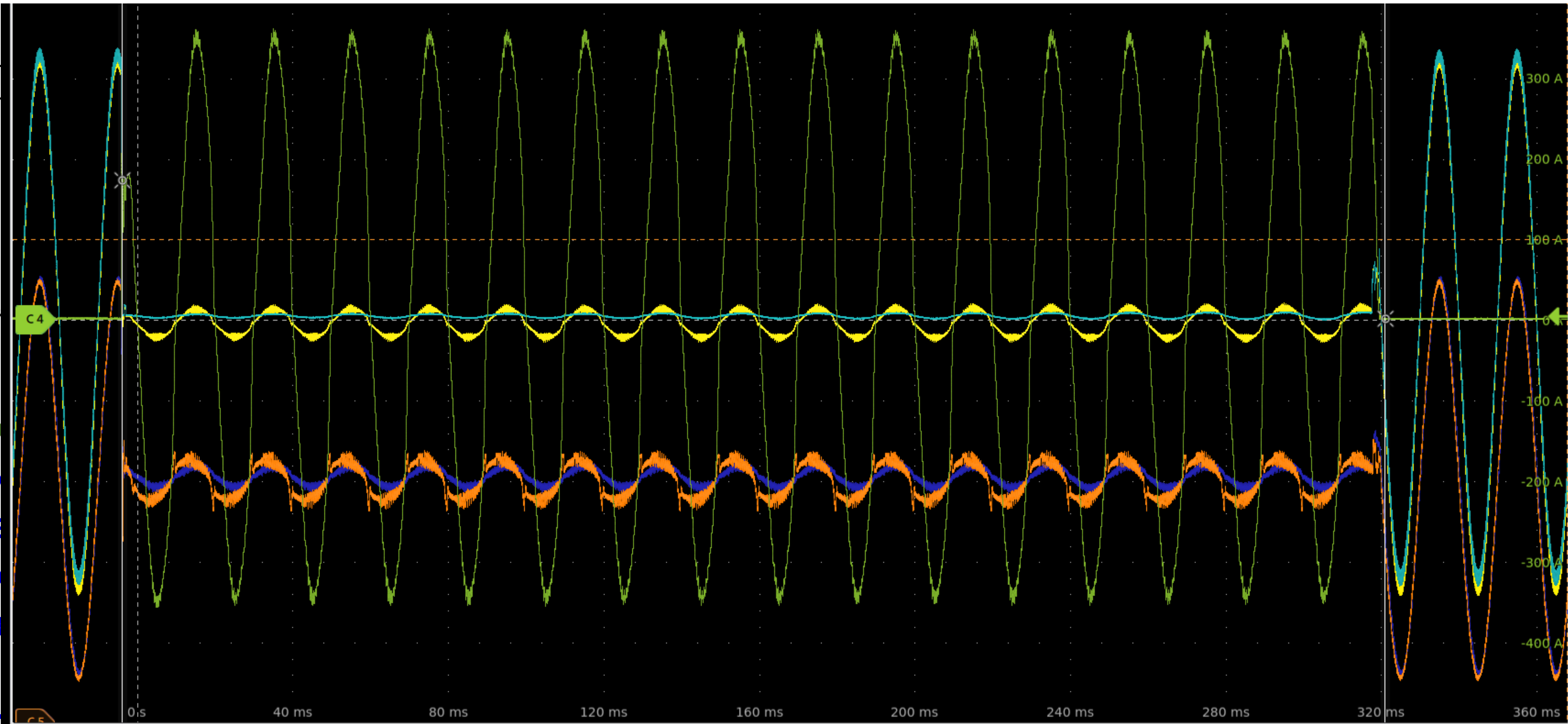
Zastosowanie wirtualnej impedancji w przekształtnikach DC/AC

- **Wirtualna impedancja** – technika polegająca zmianie napięcia wyjściowego w przekształtniku w funkcji prądu tak aby emulować występowanie dodatkowej impedancji. Impedancja ta może być nieliniowa.



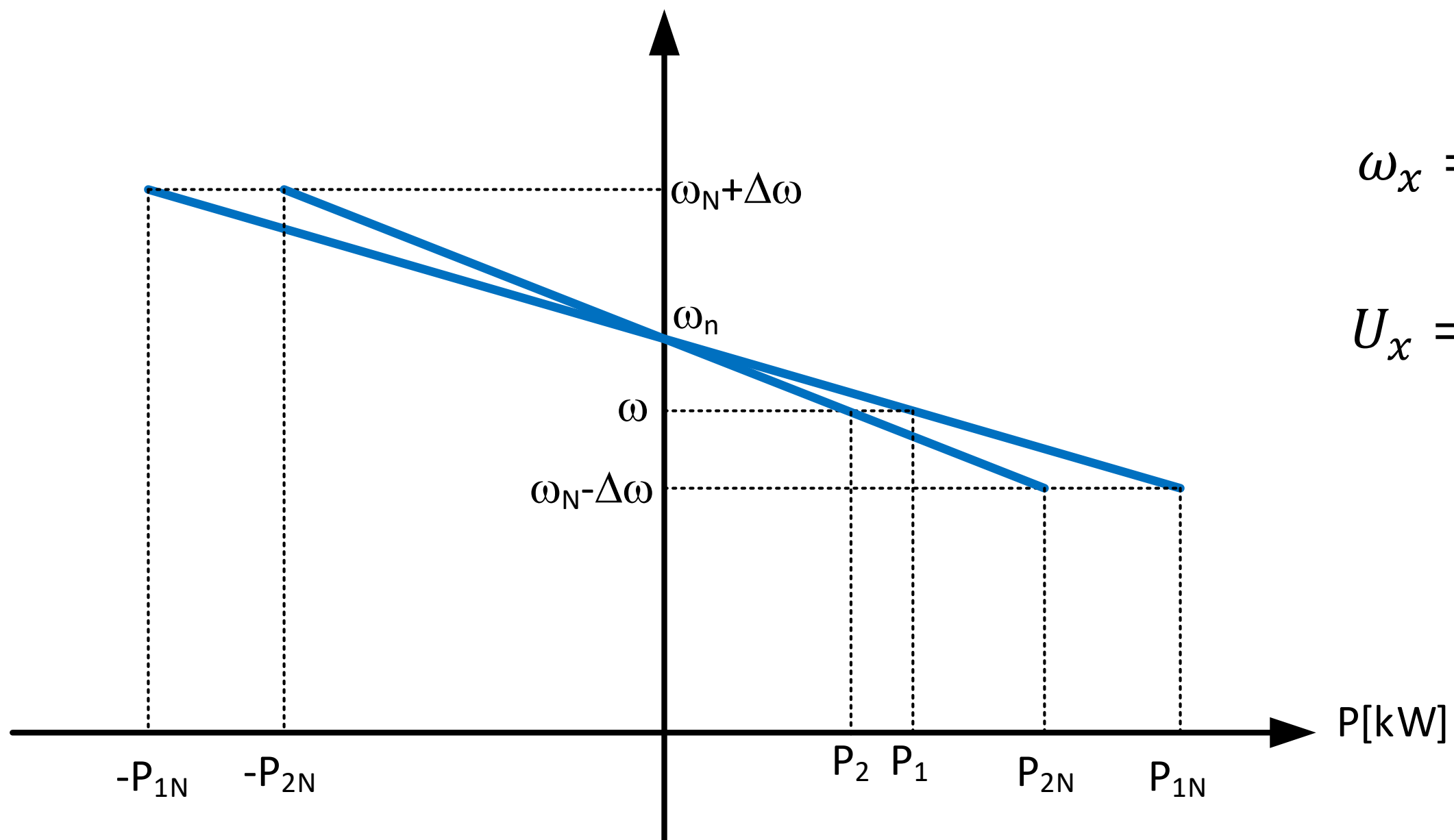
$$\begin{bmatrix} u_{Xd} \\ u_{Xq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{Fd} \\ u_{Fq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_w \\ \end{bmatrix}$$

- **Przykład zastosowania**
DC/AC 45 kVA (6
przepalenie wkł
Zastosowanie ni
przed wyłączeni
proces rozruchu
czy załączenie pr

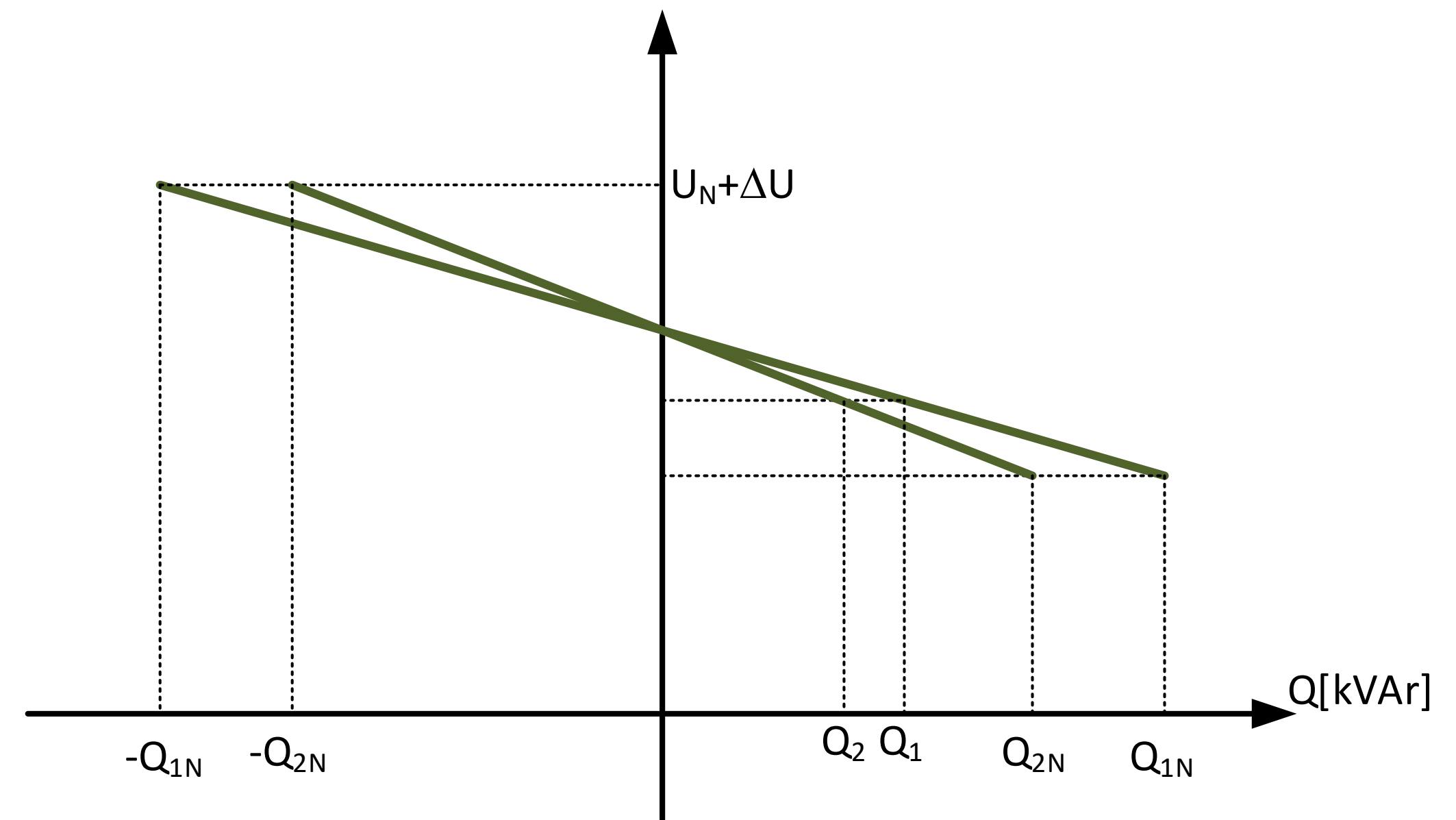


Zastosowanie charakterystyk P- ω /Q-U w przekształtnikach DC/AC

- **Charakterystyki P- ω /Q-U** – technika polegająca zmianie częstotliwości generowanego napięcia w przekształtniku w funkcji mocy czynnej oraz zmianie napięcia napięcia wyjściowego w przekształtniku w funkcji mocy biernej. Stosowana w pracy równoległej przekształtników.



$$U_x = U_n - \frac{\Delta U}{Q_{xN}} Q_x$$

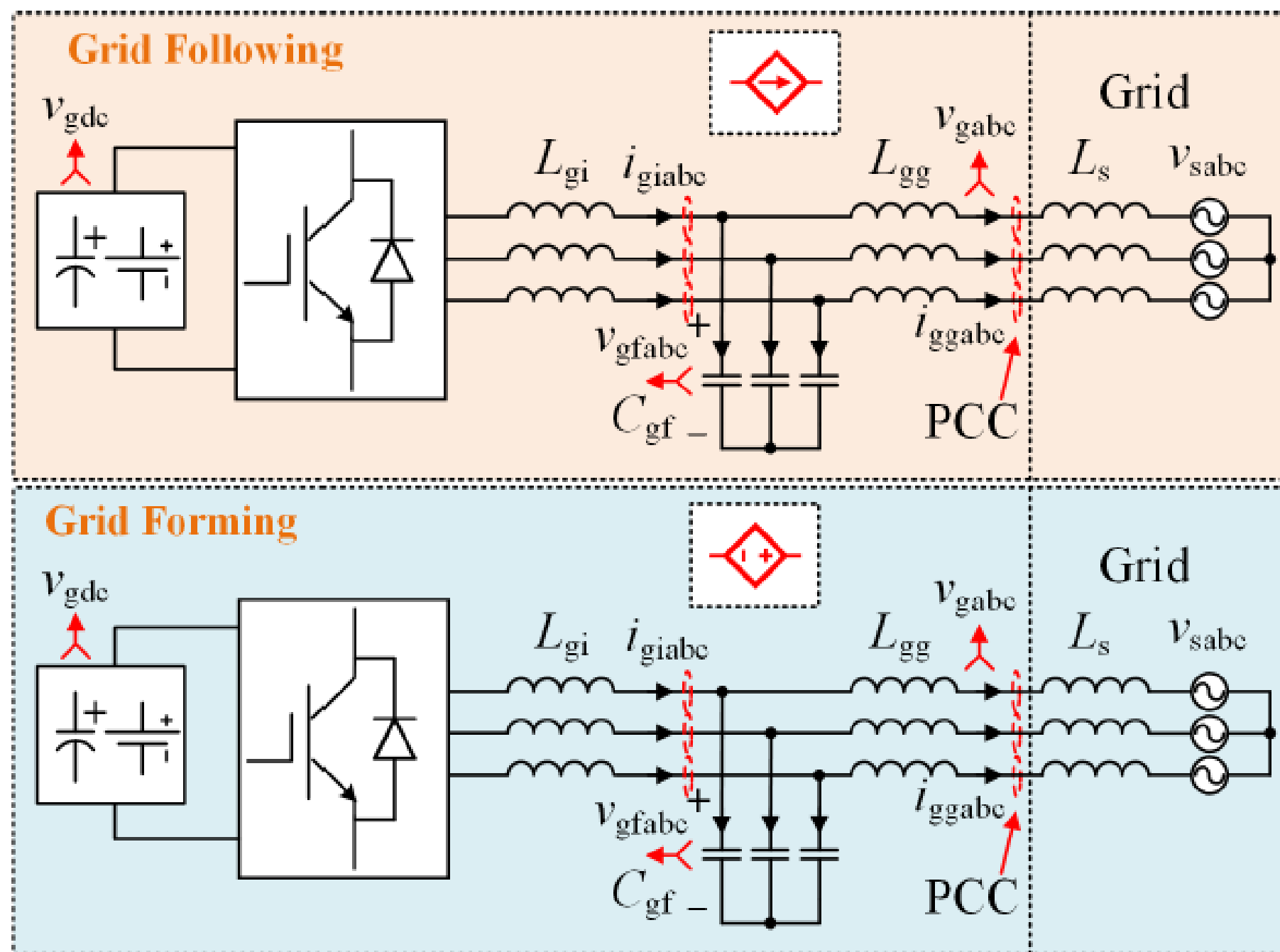


- **Możliwość współpracy przekształtników o różnych mocach**
- **Możliwość pracy zarówno z odbiornikami jak i źródłami energii**
- **Błąd równomiernego rozłożenia obciążenia zależy od impedancji – możliwość kompensacji przez impedancję wirtualną**
- **Założenie współpraca z zasobnikiem energii**

Przekształtniki DC/AC typu Grid-Forming

- Przekształtnik Grid-Forming (GFM converter) – przekształtniki współpracujące ze źródłami OZE i zasobnikami, które nie pracują jako źródła prądu synchronizowane z siecią, a jako sterowane źródła napięcia o kontrolowanej częstotliwości i wartości napięcia. Ich praca przypomina pracę generatora synchronicznego. Mogą współpracować z siecią dystrybucyjną jak i pracować na sieci wydzielone. Poprzez odpowiednie algorytmy mogą emulować inercję i zapewniać tłumienie oscylacji częstotliwości.

Budowa – budowa przekształtników GFL i GFM jest praktycznie identyczna, różnica wynika ze sterowania



Idea sterowania – w przekształtniku typu GFL sterowanie odbywa się w oparciu o kształtowanie prądów w układzie powiązanim z napięciem sieci, w przekształtniku typu GFM przekształtnik mierzy generowaną moc w punkcie jego przyłączenia do sieci i stara się tak sterować aby utrzymać zadaną wartość napięcia i częstotliwości w punkcie przyłączenia do sieci.

Przebieżalność – ze względu na charakter sterowania przekształtnikiem typu GFM wymagana jest zwiększona przebieżalność przekształtnika (typowo ok 300 %).

Źródło: <https://doi.org/10.3390/en18174565>

Przekształtniki DC/AC typu Grid-Forming

- Przykład sterowania przekształtnikiem typu Grid-Forming – układ sterowania zawiera dwa podukłady: wewnętrzną pętlę regulacji napięć i prądów oraz nadrzędną regulację mocy czynnej i biernej. Regulacja odbywa się w oparciu o transformację o kąt wyznaczany a nie mierzony (bez synchronizacji).

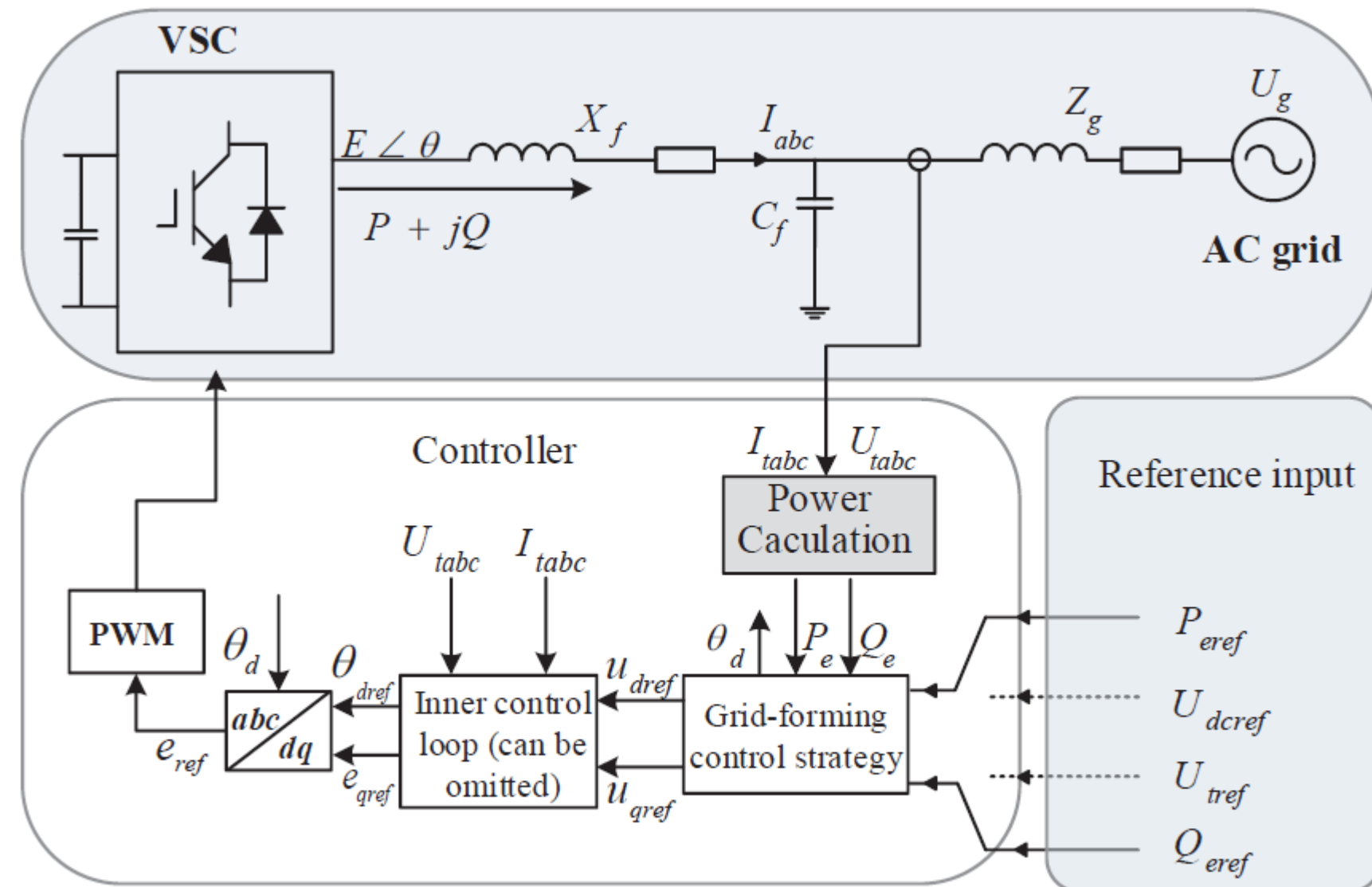


Fig. 2 Block of GFM control

Źródło: DOI: 10.1016/j.gloei.2022.06.010

Wewnętrzna pętla regulacji – pętla regulacji zbliżona jest do sterowania przekształtnikiem GFL, zadane wartości pochodzą z nadrzędnej pętli regulacji opartej o strategię GFM.

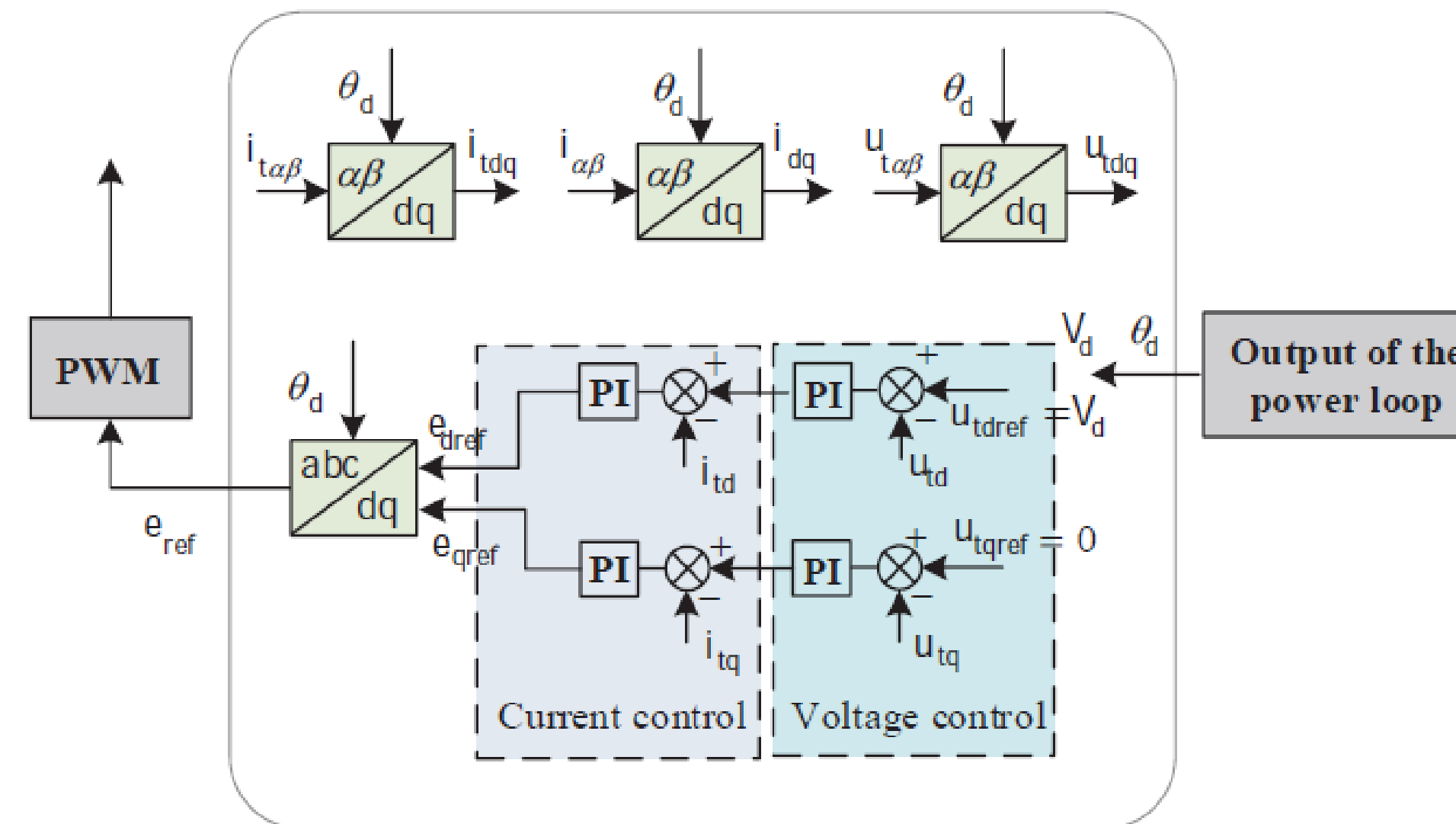


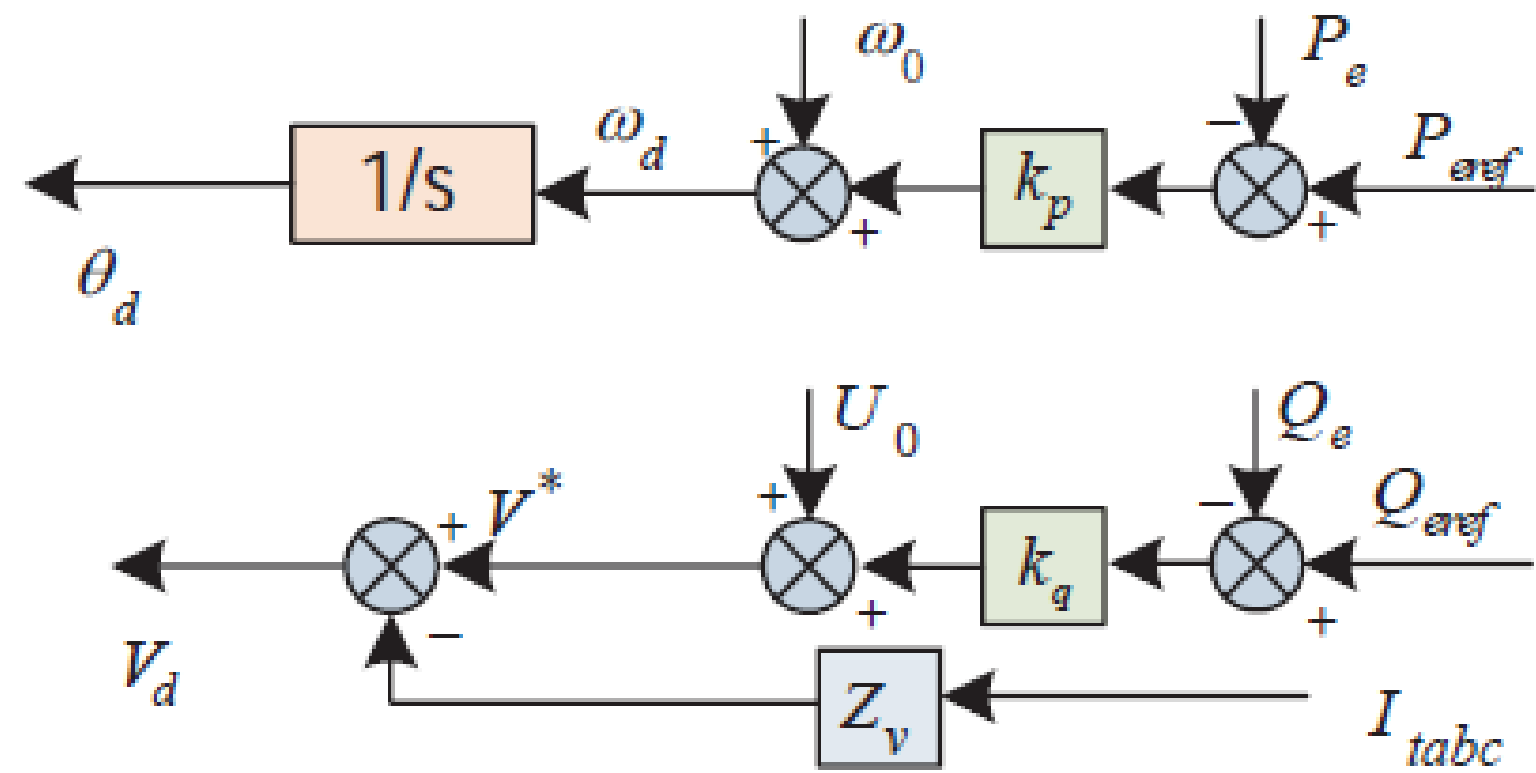
Fig. 3 Inner control loops of GFM control

Wielkości kontrolowane

- prąd dławika
 - prąd sieci
 - napięcie kondensatora
- Kontrola tych wielkości zapewni szybką realizację mocy zadanych w przekształtniku

Przekształtniki DC/AC typu Grid-Forming

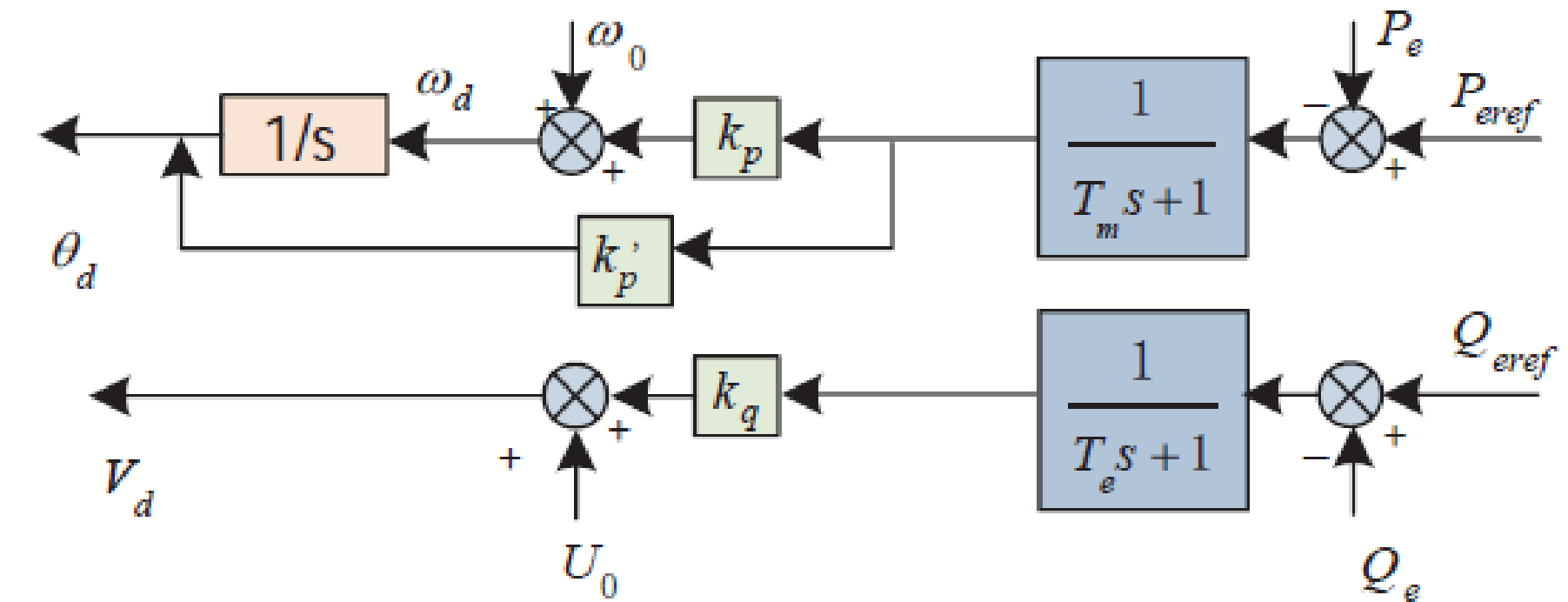
Nadrzędna pętla regulacji – układy bazujące na charakterystykach P- ω /Q-U. Podstawowa metoda charakteryzuje się możliwością powstawania oscylacji mocy, które można wytłumić impedancją wirtualną. Zastosowanie filtrów oraz sprzężenia od błędu mocy tłumi oscylacje mocy i poprawia stabilność sterowania.



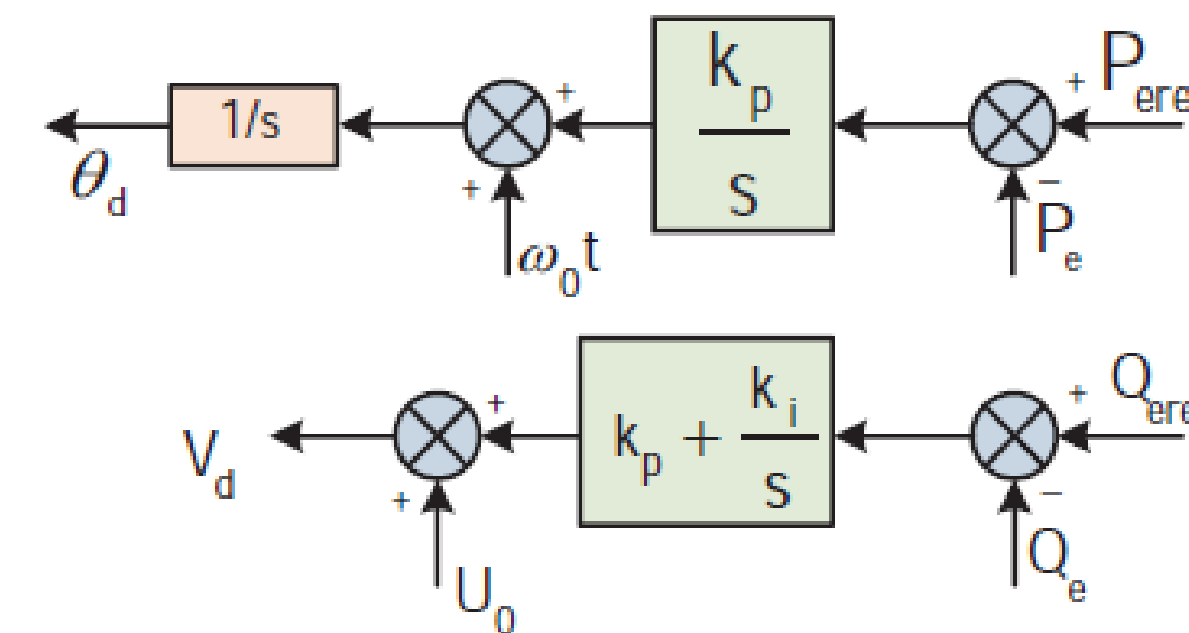
(b) Virtual impedance loop-based droop control

Nadrzędna pętla regulacji – układy wykorzystujące synchronizację bazującą na mocy PSL. Symuluje działanie części mechanicznej generatora synchronicznego. Działanie lepsze niż synchronizacja z napięciem sieci przy sieci miękkiej.

Źródło:
DOI: 10.1016/j.gloei.2022.06.010



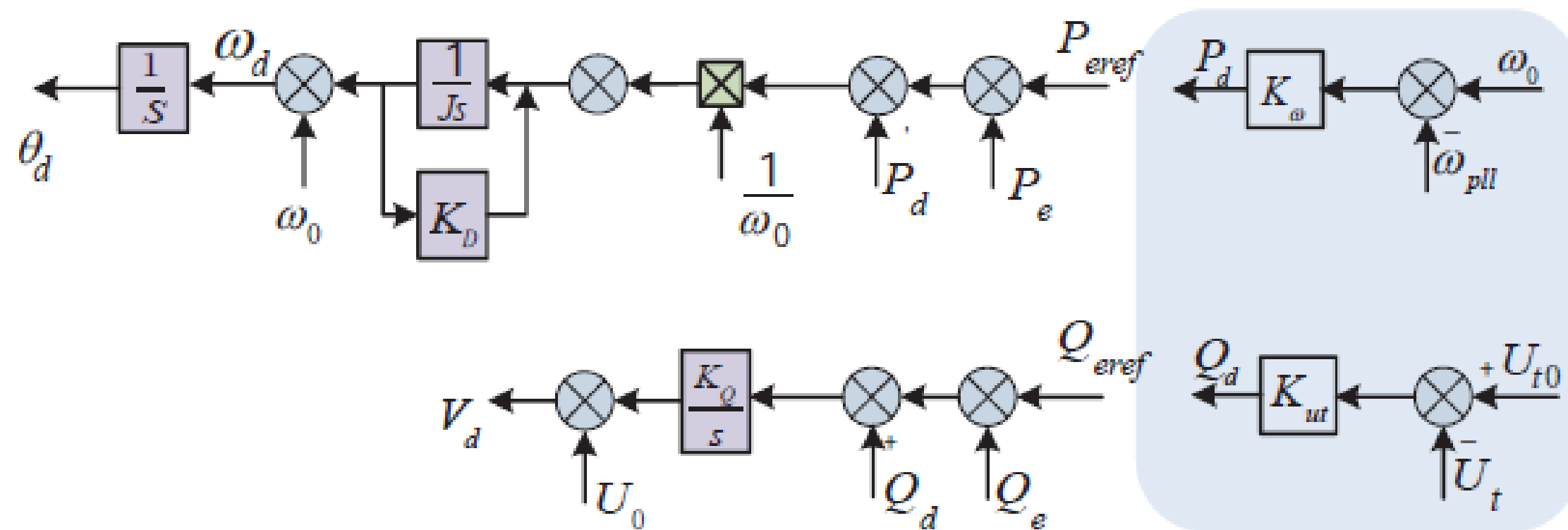
(c) Self-sync droop control



(a) Conventional power synchronization control

Przekształtniki DC/AC typu Grid-Forming

Nadrzędna pętla regulacji – układy bazujące na wirtualnym modelu maszyny synchronicznej. Wykorzystują model matematyczny maszyny synchronicznej. Dodatkowo umożliwiają ograniczanie wartości prądów w przypadku zwarcia, zapadów napięcia w sieci. Modelują zarówno część elektryczną jak i mechaniczną generatora.



(c) Primary frequency modulation and primary voltage modulation of VSM

Źródło: DOI: [10.1016/j.gloei.2022.06.010](https://doi.org/10.1016/j.gloei.2022.06.010)

Przykład rozwiązania – układ regulacji obejmuje emulację równania mechanicznego turbiny z tłumieniem oscylacji, układ całkujący w torze regulacji mocy biernej oraz wykorzystanie charakterystyk P- ω /Q-U.

Układy bazujące na modelu wirtualnej maszyny synchronicznej charakteryzują się mniejszą dynamiką zmian, ale równocześnie muszą być przygotowane na większe przeciążenia prądem. Rozwiązania takie wydają się być dobre dla układów z magazynami energii. Niekoniecznie dla samych źródeł OZE.

Podsumowanie

- Przekształtniki współpracujące ze źródłami OZE pracują jako sterowane źródła prądu synchronizowane z siecią (grid-following converters GFL) lub jako sterowane źródła napięcia wpływające na napięcie i częstotliwość w punkcie przyłączenia (grid-forming converters GFM)
- Przekształtniki GFL spełniają wymagania NCRfG związane ze zmianą napięcia i częstotliwości oraz utrzymaniem się w pracy w przypadku zwarcia, co jest realizowane z dużą dynamiką w zakresie prądu znamionowego
- Aby przekształtniki typu GFM mogły realizować swoją funkcję muszą charakteryzować się przeciążalnością co najmniej 300 %
- Zastosowanie wirtualnej impedancji oraz charakterystyk $P-\omega/Q-U$ wspomaga proces generacji prądów zwarciovych oraz wspomaga pracę równoległą przekształtników
- Przekształtniki typu GFM, dzięki odpowiednim algorytmom sterowania, przeciążalności, zasobnikom energii pozwalają na realizację dodatkowych funkcjonalności

Dziękuję za uwagę