

# UKŁADY ENERGOELEKTRONICZNE W SYSTEMACH DYSTRYBUCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

**Ryszard STRZELECKI**

**rstrzele@am.gdynia.pl**

KRAKÓW, 20 kwietnia 2010

## Wprowadzenie – cel referatu

**Jednym z warunków przekształcenia systemów elektroenergetycznych (SEE) z uwzględnieniem wymogów poprawy jakości zasilania i odbioru energii elektrycznej (EE) oraz poprawy bezpieczeństwa zasilania i efektywności energetycznej jest upowszechnienie w elektroenergetyce nowoczesnych układów energoelektronicznych**

### Cel referatu

Przedstawienie miejsca oraz możliwości zastosowania nowoczesnych układów energoelektronicznych (UE) w systemach dystrybucji energii elektrycznej (SDEE), w tym z uwzględnieniem systemów z udziałem źródeł rozproszonych/alternatywnych.

Dodatkowym celem jest przedstawienie wybranych rozwiązań praktycznych, ilustrujących częściowo możliwości krajowego potencjału naukowego.



Koncepcja „inteligentnej” sieci elektroenergetycznej

# Plan referatu

- Istota energoelektroniki
- Miejsce energoelektroniki w elektroenergetyce
- Układy energoelektroniczne (UE) w systemach z alternatywnymi źródłami energii elektrycznej (EE)
- Układy energoelektroniczne (UE) jako sprzęgi i sterowniki sieciowe
- Układy energoelektroniczne (UE) do poprawy jakości energii elektrycznej (EE)
- Wybrane krajowe rozwiązania prototypowe
  - falownik 4-poziomowy 6kV/1MVA
  - quasi-Z falownik do źródeł niskonapięciowych
  - układ APF dużej mocy z filtrem sprzęgającym LCL
  - prostownik 18-pulsowy z dławikami sprzężonymi
- Podsumowanie

3

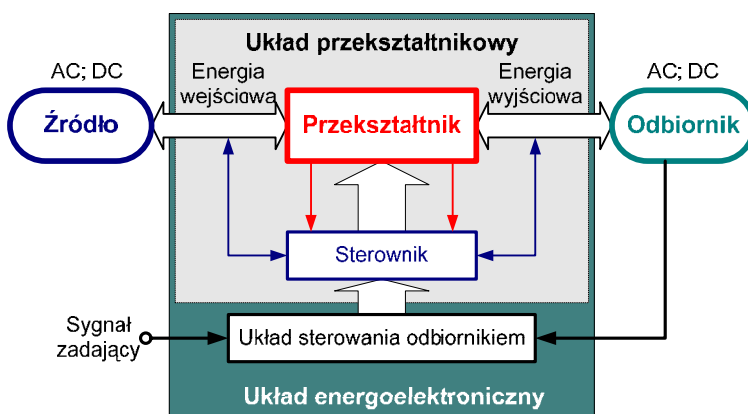
## Istota energoelektroniki

### ENERGOELEKTRONIKA

?

Technika impulsowego przetwarzania sygnałów + **sprawność**

Technika związana z wysokosprawnym przekształcaniem, sterowaniem i dopasowaniem parametrów energii elektrycznej, w zależności od parametrów źródła zasilania i potrzeb urządzeń zasilanych, z zastosowaniem **elektronicznych układów przekształtników mocy**



Ogólna struktura układu energoelektronicznego

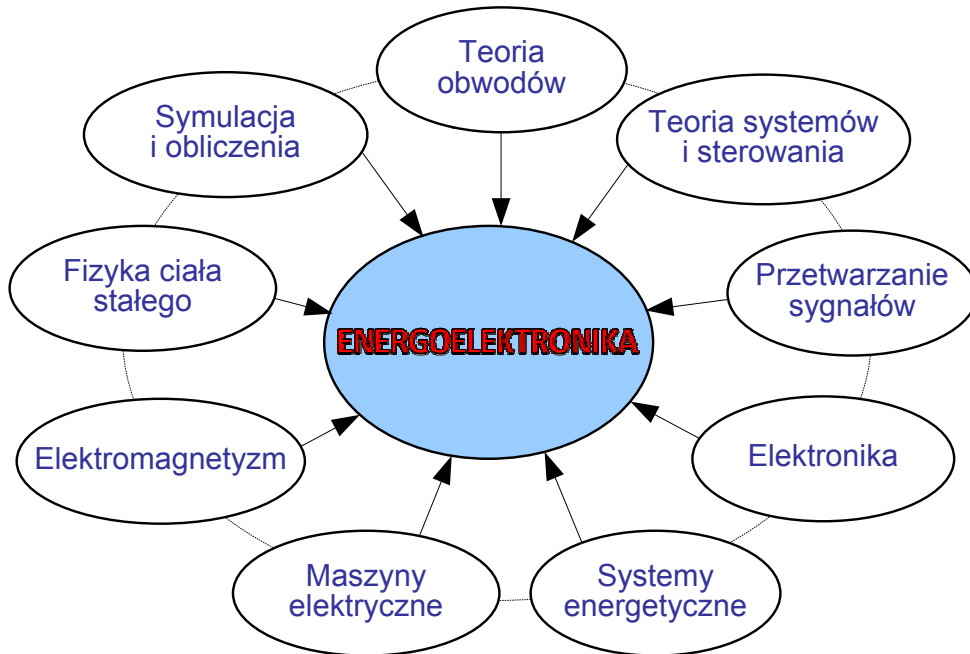
Proces przepływu energii ze źródła do zasilanego urządzenia (obciążenia, odbiornika) powinien odbywać się przy:

- ✓ wysokiej sprawności i dużej niezawodności
- ✓ małych gabarytach i ciężarze przekształtnika oraz niskich kosztach

4

# Istota energoelektroniki

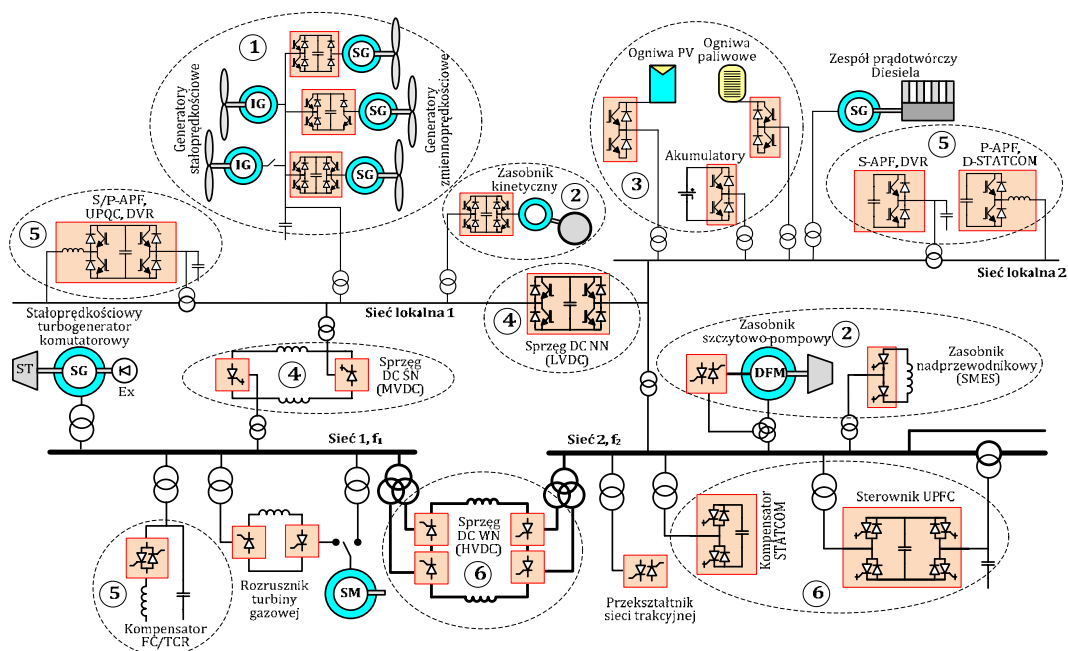
## Interdyscyplinarny charakter energoelektroniki



5

# Miejsce energoelektroniki w elektroenergetyce

## Najważniejsze obszary zastosowań - zestawienie

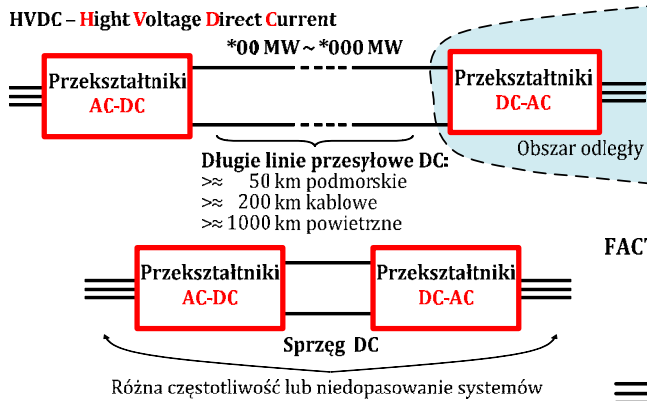


Energetyka wiatrowa (1); Magazynowanie EE (2); Zasilanie ze źródeł niskonapięciowych (3); Sprzężenie sieci (4); Poprawa jakości EE (5); Sterowanie przesyłem EE (6);

6

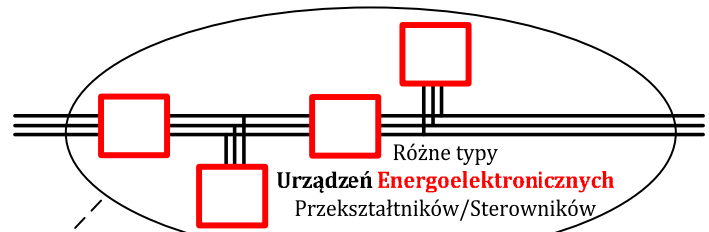
# Miejsce energoelektroniki w elektroenergetyce

## Systemy przesyłowe



**Energoelektronika**  
w systemach przesyłu prądem stałym – systemy HVDC

## FACTS – **F**lexible **A**lternating **C**urrent **T**ransmission **S**ystem



## Energoelektronika

w systemach przesyłu prądem przemiennym – systemy FACTS:

kompensatory równoległe (SVC, STATCOM), kompensatory szeregowo (TCSC, TSSC, SSSC), przesuwniki fazowe (SPS), zunifikowane sterowniki przepływu mocy (UPFC)

**Linia przesyłowa AC o:** \*0 MW ~ \*00 MW

- kontrolowanej wymianie mocy
- wyższej zdolności przesyłowej

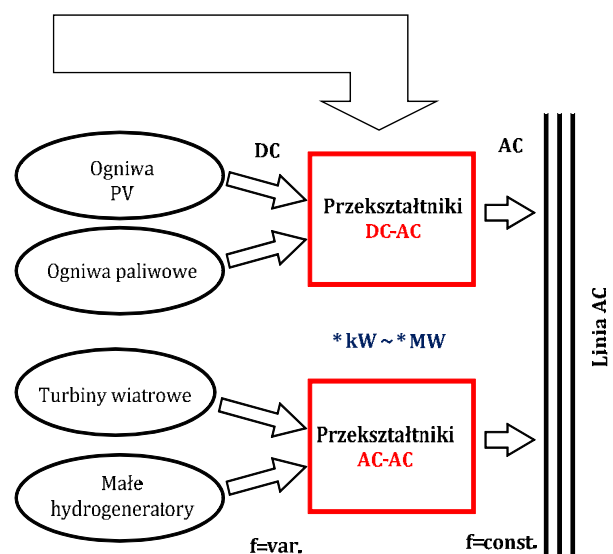
7

# Miejsce energoelektroniki w elektroenergetyce

## Systemy dystrybucji (1)

### Zastosowania (ogólnie):

- dopasowanie parametrów i sprzęganie rozproszonych źródeł alternatywnych/odnawialnych z linią zasilającą lub lokalnym odbiorcą, oraz sterowanie poborem EE z tych źródeł,
- dopasowanie parametrów i sprzęganie zasobników energii z linią zasilającą, oraz sterowanie wymianą EE pomiędzy zasobnikami a linią
- poprawa jakości zasilania i odbioru EE, w tym, między innymi: dopasowanie poziomów oraz kompensacja zapadów i chwilowych wzrostów, a także niesymetrii i odkształceń napięcia zasilającego, oraz kompensacja odkształceń, niesymetrii i przesunięć fazowych prądu odbiornika

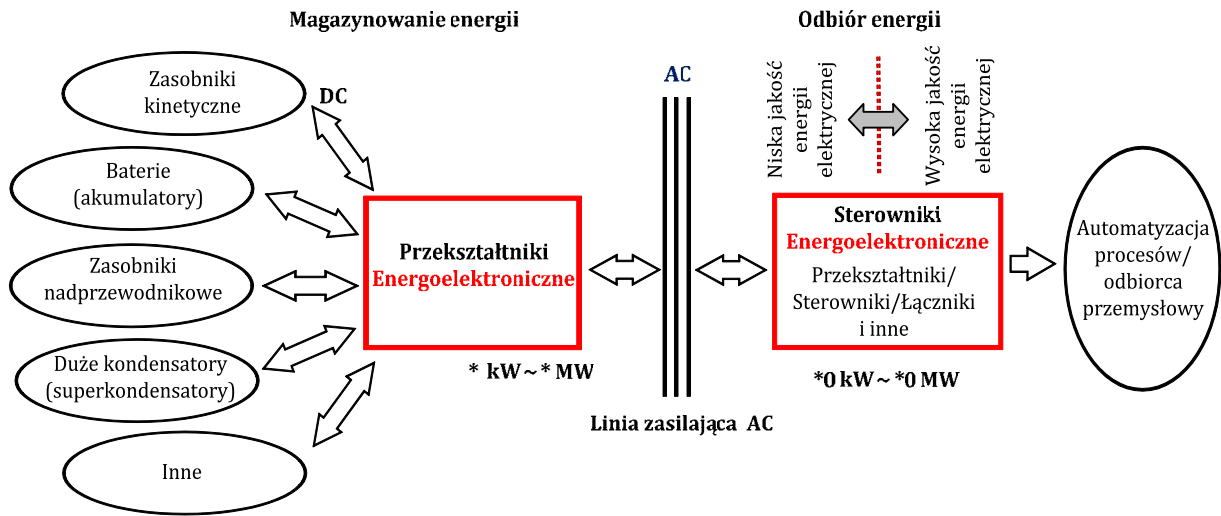


**Energoelektronika** w systemach ze źródłami alternatywnymi

8

# Miejsce energoelektroniki w elektroenergetyce

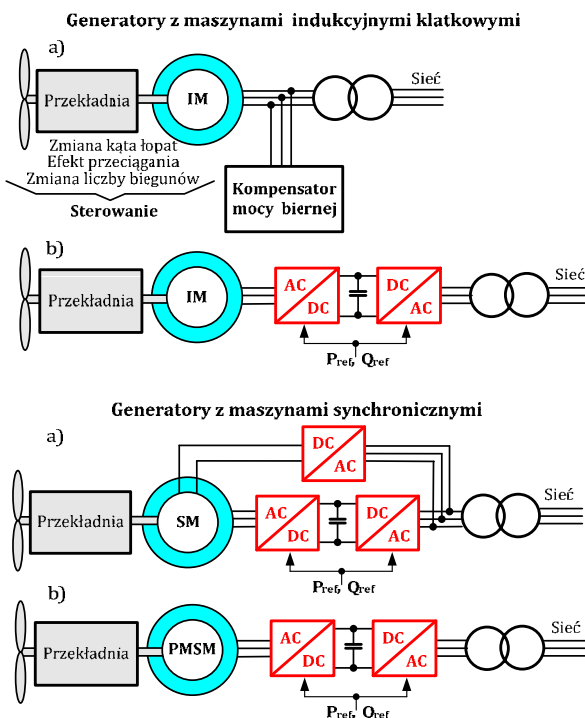
## Systemy dystrybucji (2)



Energoelektronika w systemach magazynowania i odbioru energii elektrycznej

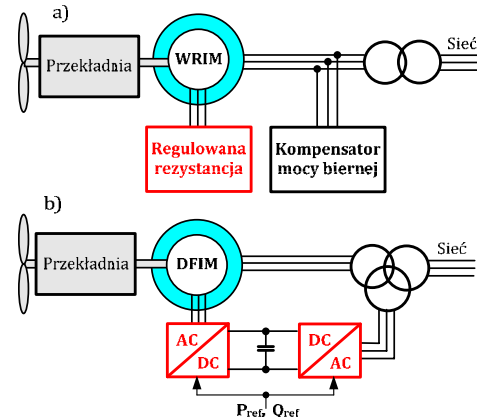
# UE w systemach z alternatywnymi źródłami EE

## Instalacje wiatrowe (1)



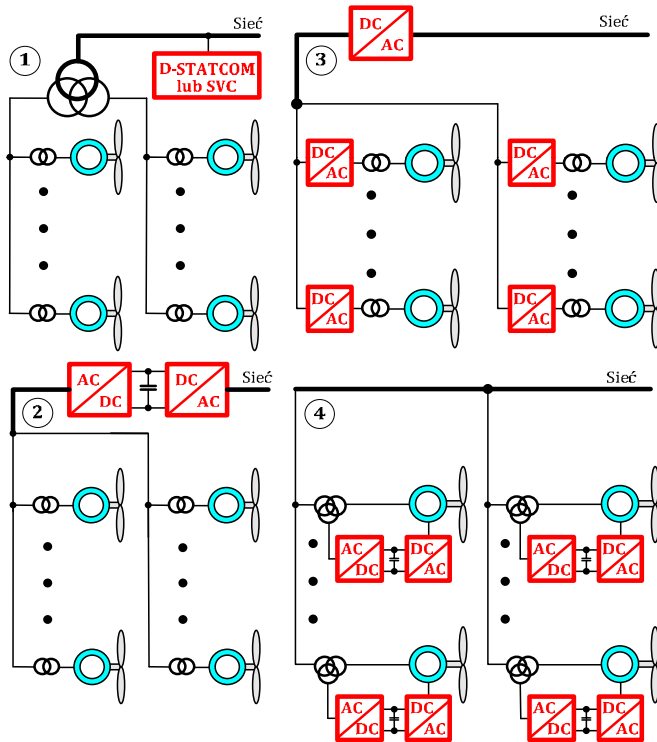
## Podstawowe rodzaje generatorów turbin wiatrowych

### Generatory z maszynami indukcyjnymi pierścieniowymi



# UE w systemach z alternatywnymi źródłami EE

## Instalacje wiatrowe (2)



### Typowe połączenie farm wiatrowych:

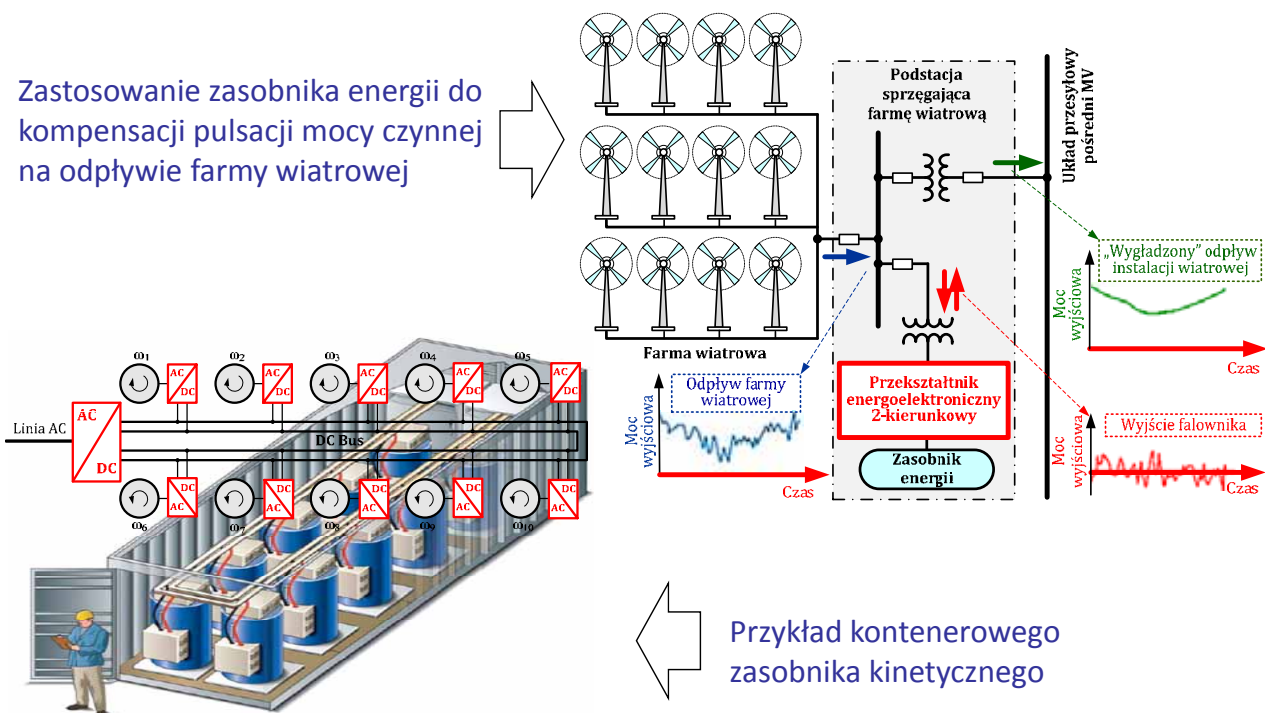
- 1) farma z kompensatorem mocy biernej (D-STATCOM lub SVC),
- 2) farma ze wspólnym sprzężeniem DC z siecią zasilającą,
- 3) farma z indywidualnym sterowaniem mocą,
- 4) farma z wewnętrzną siecią DC i indywidualnym sterowaniem mocą

11

# UE w systemach z alternatywnymi źródłami EE

## Zasobniki energii

Zastosowanie zasobnika energii do kompensacji pulsacji mocy czynnej na odpływie farmy wiatrowej

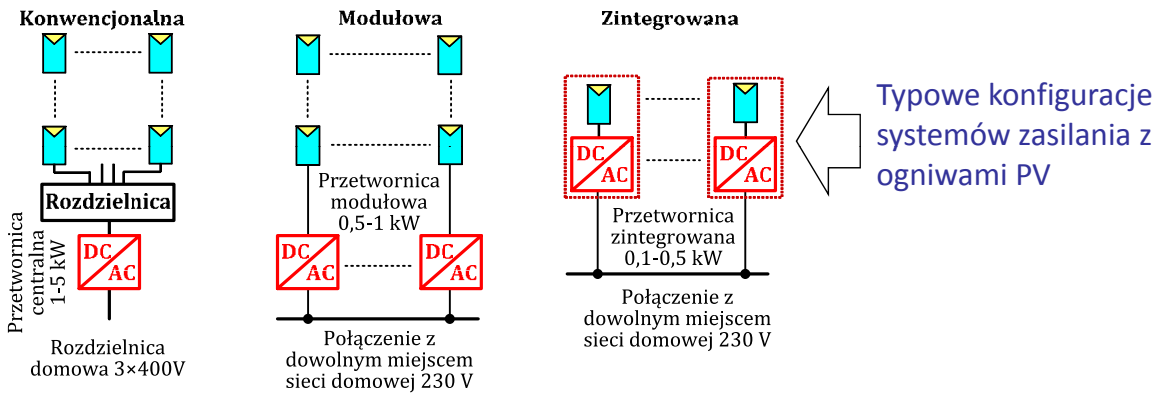


Przykład kontenerowego zasobnika kinetycznego

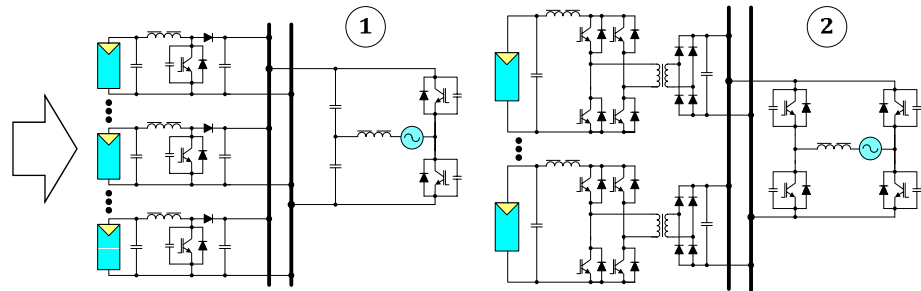
12

# UE w systemach z alternatywnymi źródłami EE

## Systemy ze źródłami niskonapięciowymi (1)

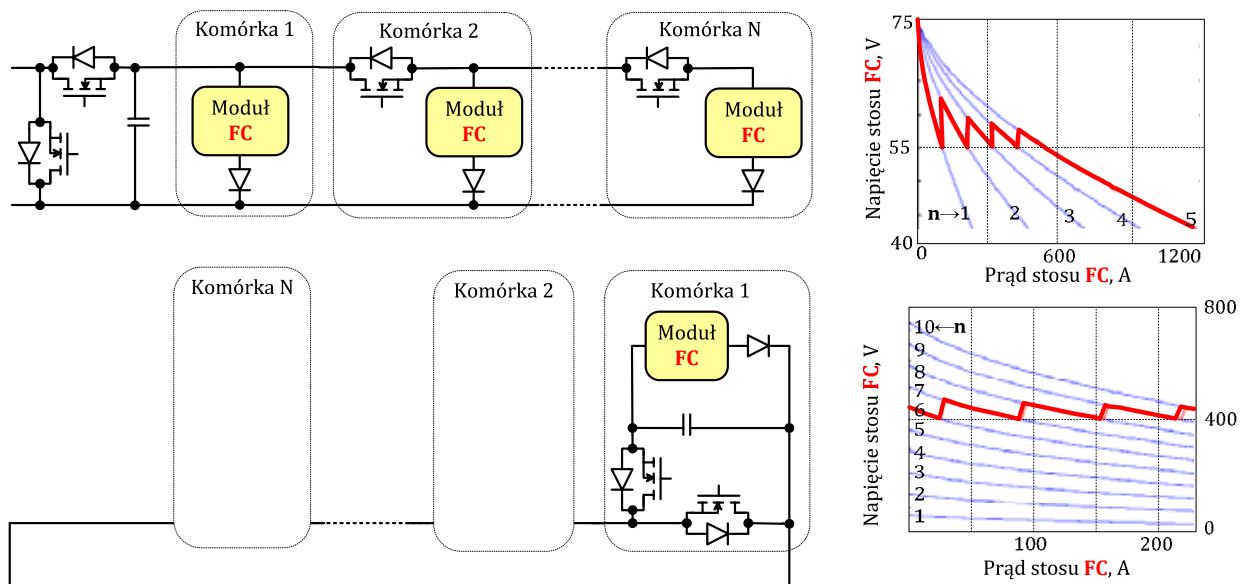


Przykładowe połączenia ogniw PV z siecią dystrybucyjną



# UE w systemach z alternatywnymi źródłami EE

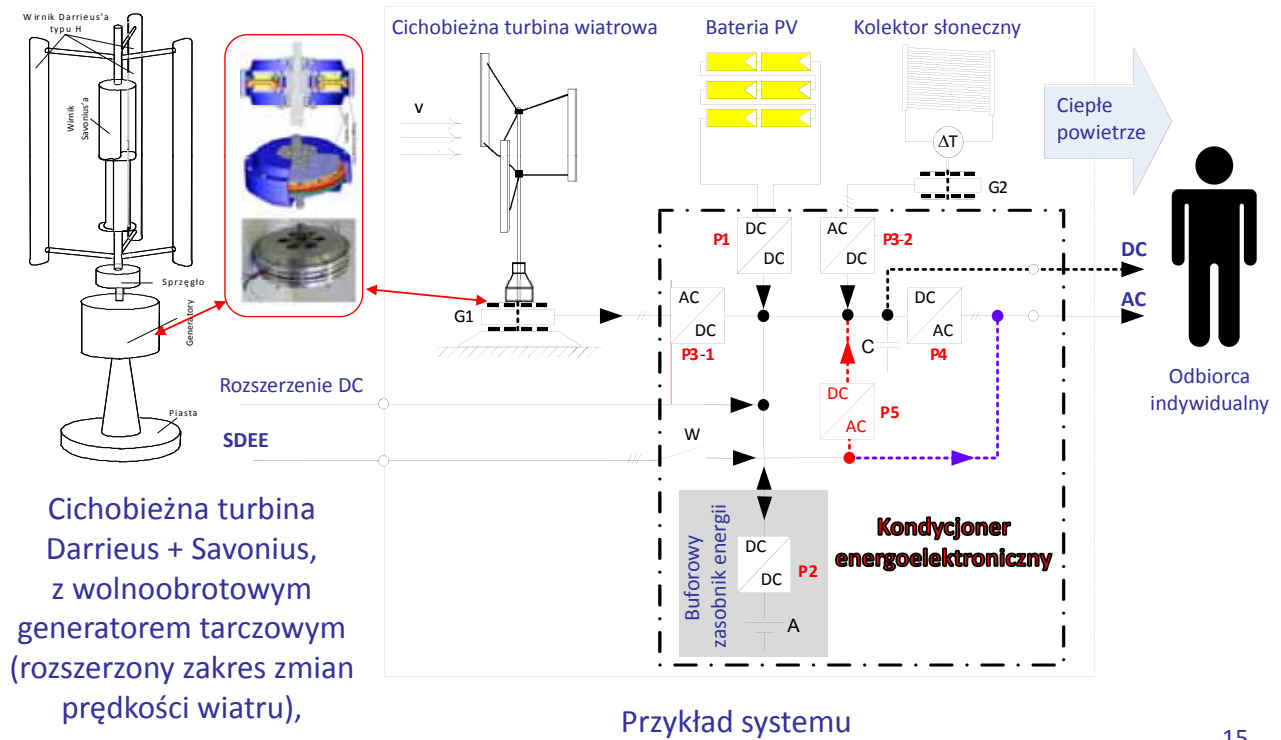
## Systemy ze źródłami niskonapięciowymi (2)



Równoległe i szeregowe połączenia modułów FC w stosy i ich charakterystyki

# UE w systemach z alternatywnymi źródłami EE

## Systemy wspomaganie zasilania odbiorców indywidualnych w EE



Cichobieżna turbina Darrieus + Savonius, z wolnoobrotowym generatorem tarczowym (rozszerzony zakres zmian prędkości wiatru),

# UE jako sprzęgi i sterowniki sieciowe

## Sprzęgi sieciowe z pośredniczącym obwodem DC

$$P_1 = \frac{V_{F1} \cdot V_{S1}}{X_1} \cdot \sin \delta_1$$

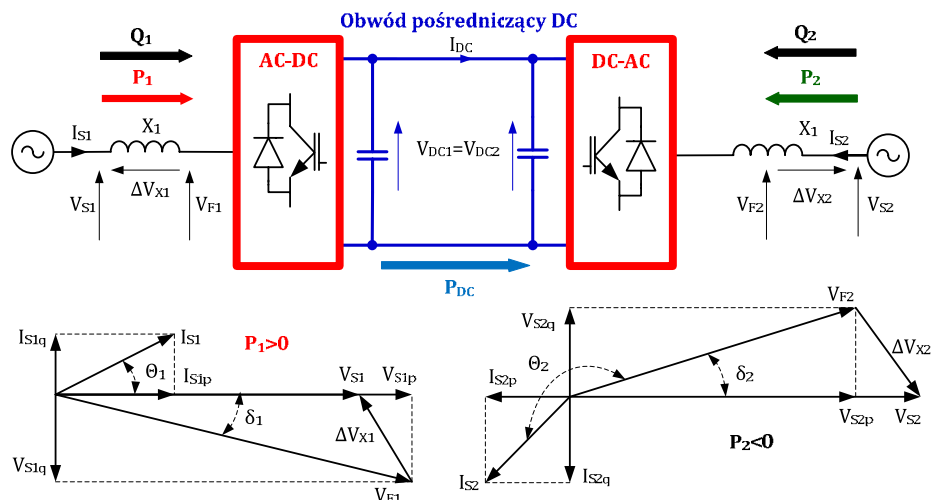
$$Q_1 = \frac{V_{F1} \cdot V_{S1}}{X_1} \cos \delta_1 - \frac{V_{F1}^2}{X_1}$$

$$P_2 = \frac{V_{F2} \cdot V_{S2}}{X_2} \cdot \sin \delta_2$$

$$Q_2 = \frac{V_{F2} \cdot V_{S2}}{X_2} \cos \delta_2 - \frac{V_{F2}^2}{X_2}$$

$$P_1 = P_{DC} = -P_2$$

$$P_{DC} = V_{DC1} \cdot I_{DC} = V_{DC2} \cdot I_{DC}$$

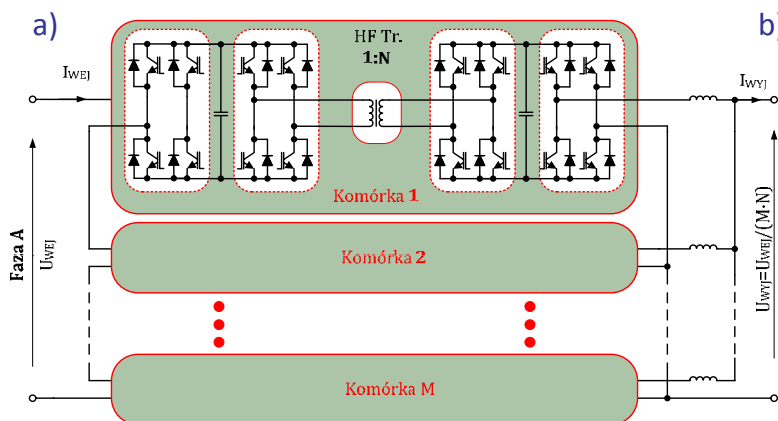


Typowy symetryczny sprzęg sieciowy „Back-to-Back” z pośredniczącym obwodem napięcia stałego



# UE jako sprzęgi i sterowniki sieciowe

## Sprzęgi sieciowe z pośredniczącym obwodem w. cz.

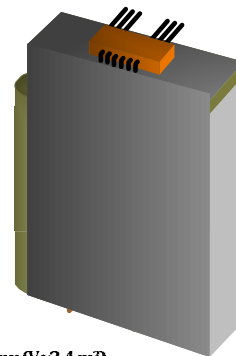


Transformator „zintegrowany”,

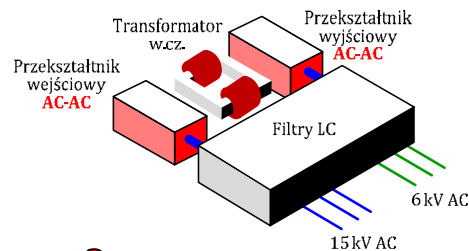
a) przykładowy schemat

b) porównanie z transformatorem konwencjonalnym

Konwencjonalny ( $V \approx 10,0 \text{ m}^3$ )



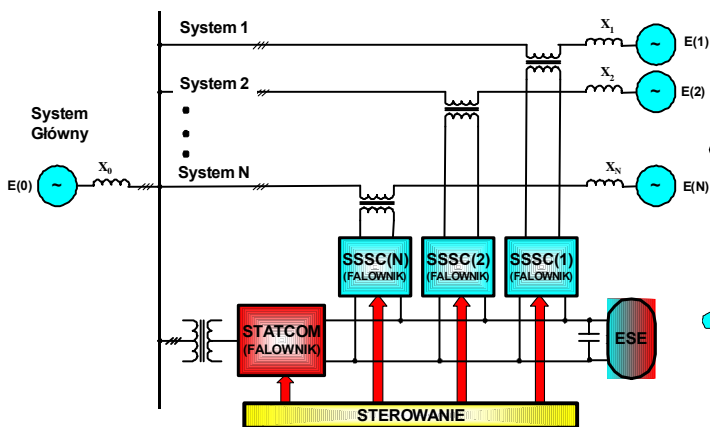
Zintegrowany ( $V \approx 3,4 \text{ m}^3$ )



**Czy to realna bliska perspektywa?**

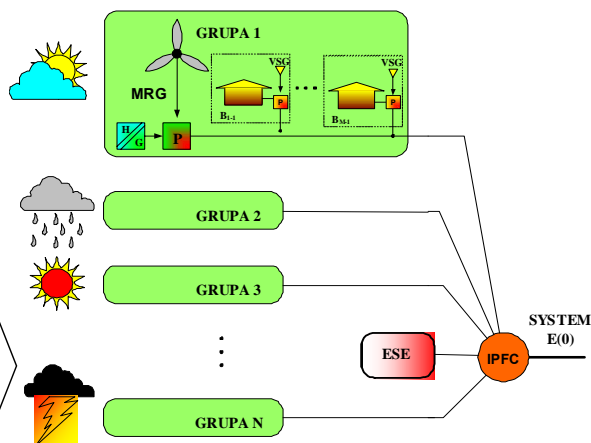
# UE jako sprzęgi i sterowniki sieciowe

## Międzyliniowe sterowniki przesyłu mocy - IPFC



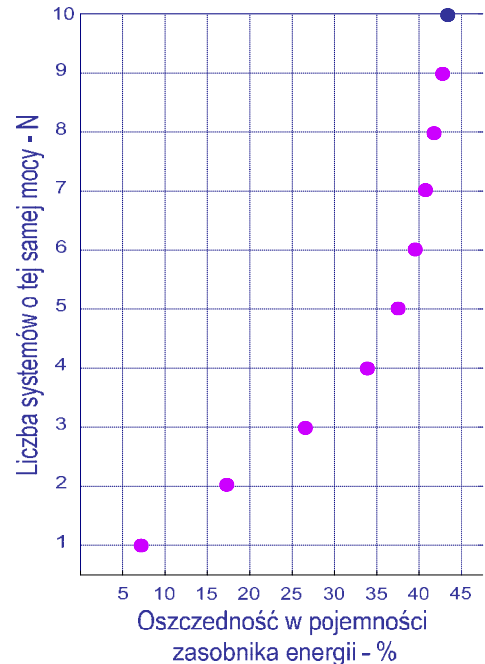
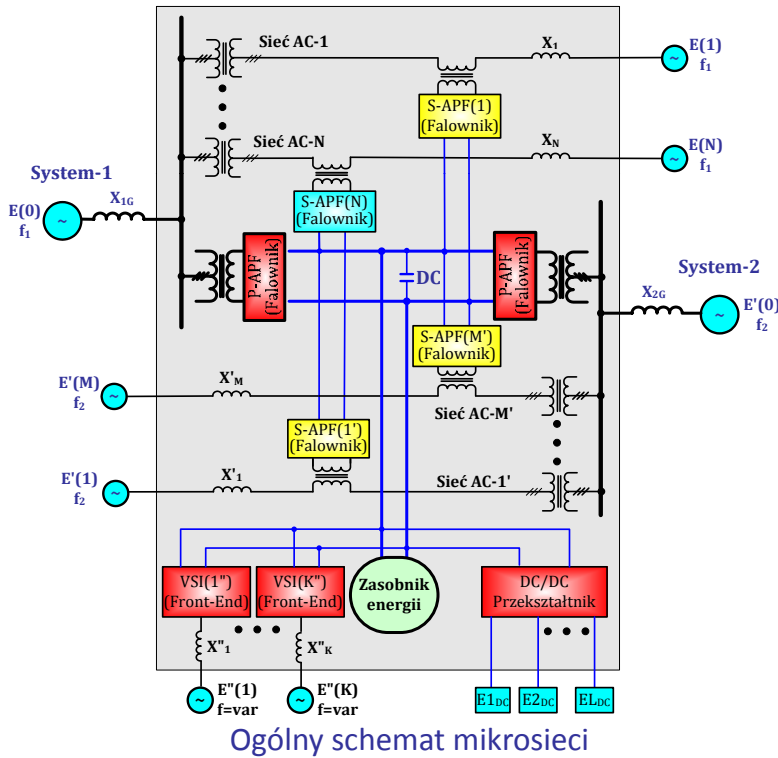
IPFC - Interlinie Power Flow Controller)

Przykład zastosowania układu IPFC do bilansowania mocy pomiędzy grupami odbiorców/dostawców EE, wspomaganych ze źródeł lokalnych



# UE jako sprzęgi i sterowniki sieciowe

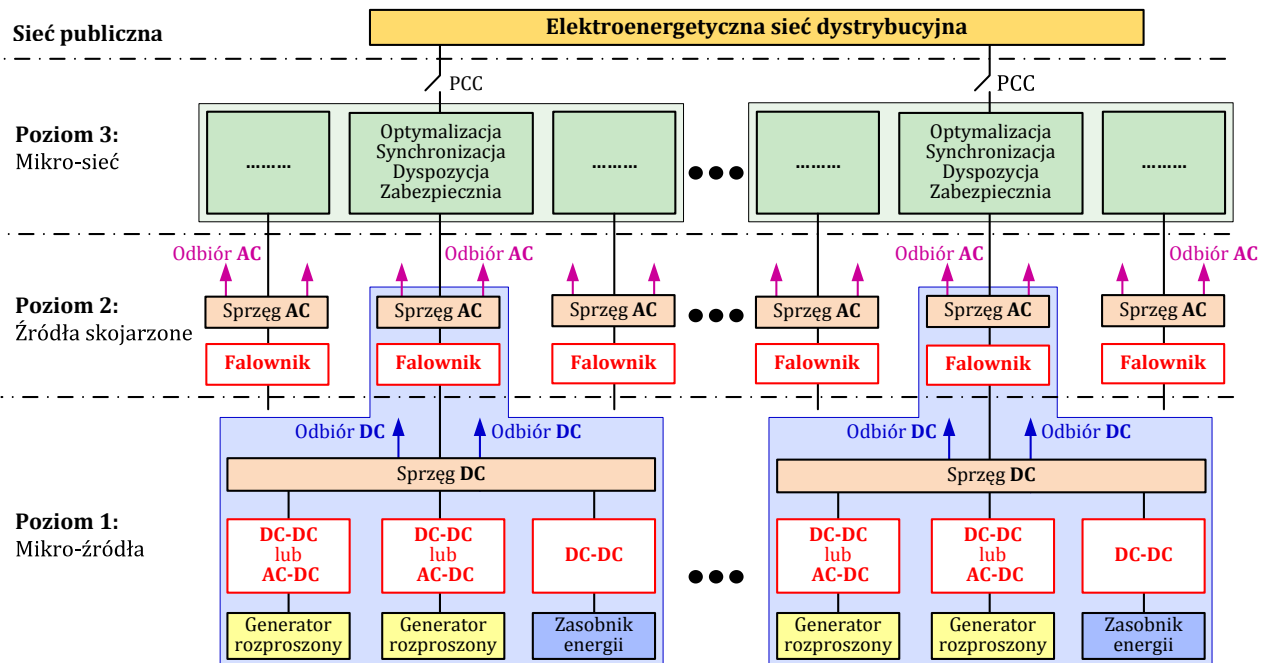
## Zastosowania w mikro sieciach – bilansowanie i oszczędności EE



Ocena probabilistyczna

# UE jako sprzęgi i sterowniki sieciowe

## Miejsce UE w mikro sieciach

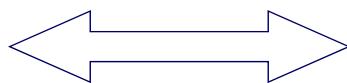


Ogólna struktura hierarchiczna mikro sieci hybrydowej ze sprzęgami DC i AC

# UE do poprawy jakości EE

## Cechy jakości...

### Dostawy



### Odbioru

Niezawodność zasilania (przerwy, zaniki)

Stołość częstotliwości

Poziom napięcia

Wahania napięcia (zapady, podskoki, flicker)

Symetria napięć

Kształt napięcia

Symetria odbioru (prądów)

Współczynnik mocy:

a) kształt prądu (harmoniczne, interharmoniczne)

b) przesunięcie fazowe prądu

Stacjonarność (udary mocy, subharmoniczne)

Poziom zaburzeń w.cz. (EMI)

...energii elektrycznej

21

# UE do poprawy jakości EE

## Sposoby poprawy niskiej jakości EE

- Rekonfiguracja, modernizacja i zwiększenie mocy linii zasilającej, w tym zamiana odbiorników na nowoczesne układy o jednostkowym współczynniku mocy
- Zastosowanie konwencjonalnych urządzeń kompensacyjno-filtracyjnych, w tym filtrów biernych LC (właściwości zależne od parametrów linii zasilającej) oraz równoległych kompensatorów tyrystorowych FC/TCR lub TCS/TCR
- Zastosowanie układów energoelektronicznych pełniących funkcję sterowanych źródeł prądu lub napięcia, w tym tzw. energetycznych kompensatorów/filtrów aktywnych (**APF**), umożliwiających natychmiastową kompensację odchyłeń wartości chwilowych napięć lub prądów od przebiegów zadanych
- Połączenie układów **APF** z zainstalowanymi wcześniej filtrami biernymi LC lub innymi kompensatorami konwencjonalnymi, w tym połączenie w integralny system hybrydowy, pozwalające zmniejszyć wymaganą moc gabarytową układów aktywnych

**Współczesna energoelektronika**

22

# UE do poprawy jakości EE

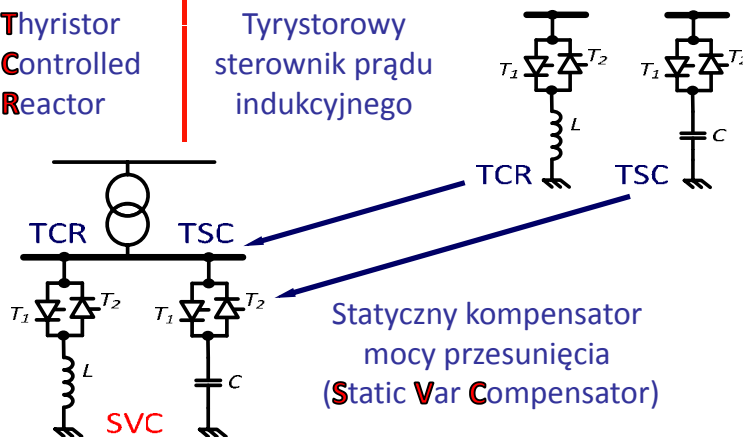
## Równoległe kompensatory TSC i TCR

Thyristor  
Controlled  
Reactor

Tyrystorowy  
sterownik prądu  
indukcyjnego

Tyrystorowy łącznik  
baterii  
kondensatorów

Thyristor  
Switched  
Capacitor



Stacyjny kompensator  
mocy przesunięcia  
(Static **V**ar **C**ompensator)

Zastosowania:

- Kompensacja mocy przesunięcia
- Kompensacja flicker'a
- Opcjonalnie – filtracja harmoniczných (dla LC)

Problemy:

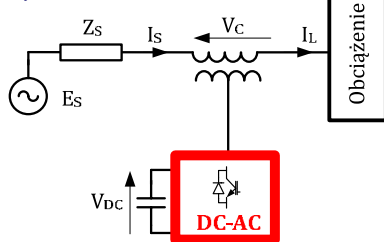
- Niska częstotliwość kompensowanych zaburzeń – max. ok. 15 Hz
- Zależność właściwości kompensacyjnych od napięcia linii
- Przetężenia przy załączaniu (dla TSC), odkształcenia prądu (dla TCR)
- Procesy przejściowe

23

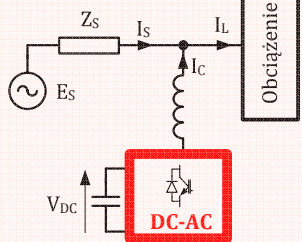
# UE do poprawy jakości EE

## Klasyfikacja układów APF

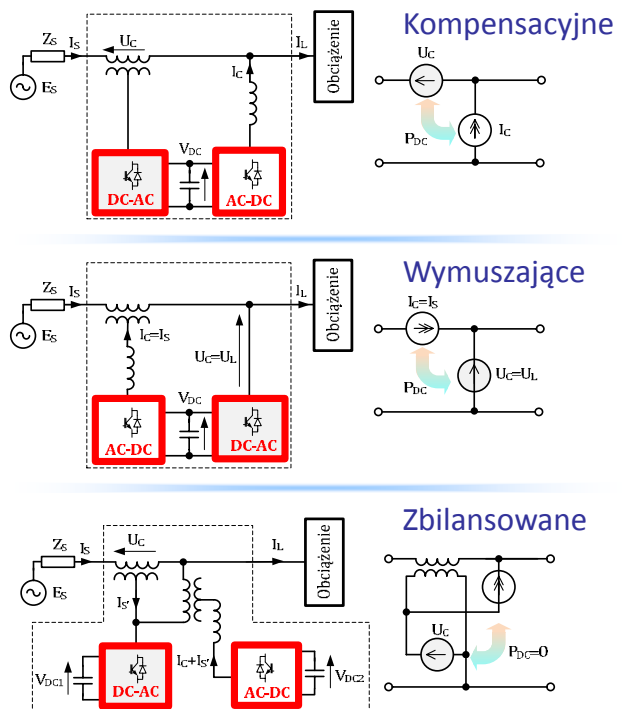
Układy szeregowe/napięciowe  
(S-APF)



Układy równoległe/prądowe  
(P-APF)



Układy szeregowo-równoległe (S/P-APF)



24

# UE do poprawy jakości EE

## Zastosowania układów APF do poprawy jakości EE

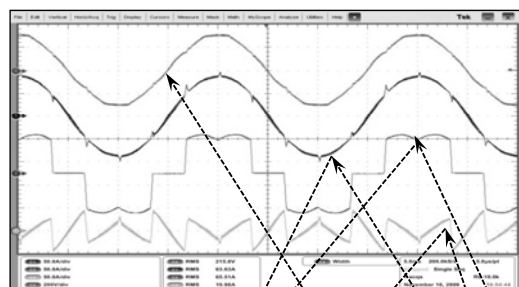
Układ APF	Zaburzenia jakości EE od strony odbiorcy	Zaburzenia jakości EE od strony zasilania
Równoległy (P-APF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kompensacja harmonicznych prądu</li> <li>- kompensacja prądu biernego</li> <li>- łagodzenie udarów prądowych</li> <li>- symetryzacja prądów</li> <li>- łagodzenie flicker'a</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- blokowanie harmonicznych napięcia</li> <li>- podtrzymanie zasilania (UPS)</li> <li>- sprzężanie zasobników energii z systemem EE</li> <li>- sprzęgi linii zasilających</li> </ul>
Szeregowy (S-APF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- blokowanie przepływu harmonicznych prądu</li> <li>- łagodzenie harmonicznych napięcia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kompensacja harmonicznych napięcia</li> <li>- stabilizacja poziomu napięcia</li> <li>- kompensacja zapadów i podskoków napięcia</li> <li>- symetryzacja napięć</li> <li>- kompensacja flicker'a</li> </ul>

25

# UE do poprawy jakości EE

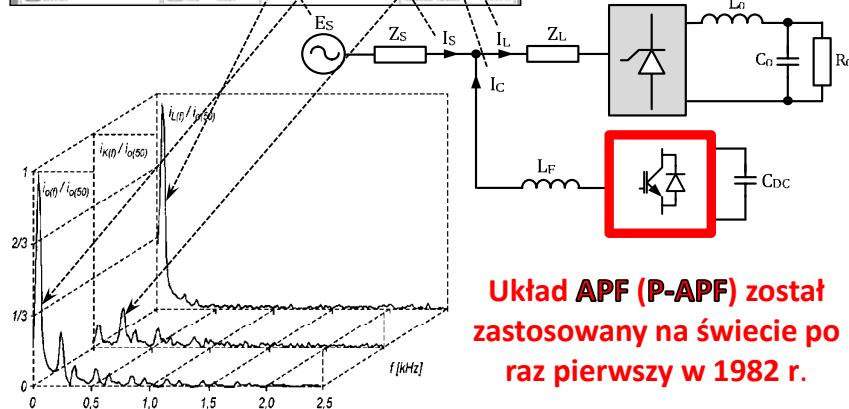
## Kompensacja harmonicznych prądu za pomocą układów P-APF

Przebiegi oraz widma prądów w typowym kompensatorze z układem P-APF



THD( $I_S$ )= 2,86 %

THD( $I_L$ )=29,75 %



**Układ APF (P-APF) został zastosowany na świecie po raz pierwszy w 1982 r.**



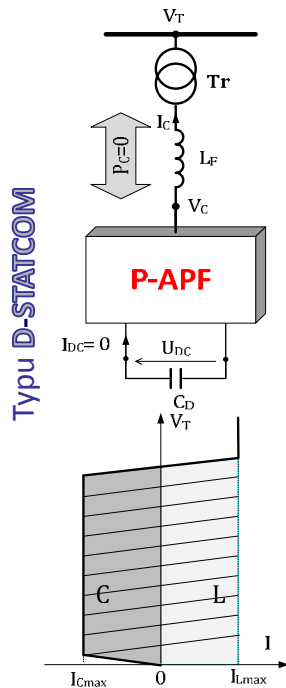
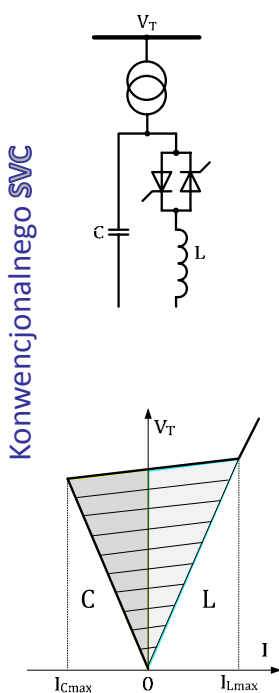
Pierwszy krajowy prototyp układu P-APF o mocy powyżej 50 kVA (1998 r.)

26

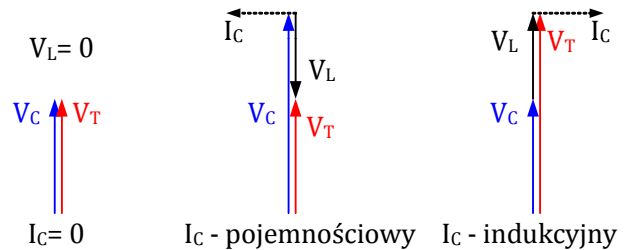
# UE do poprawy jakości EE

## Kompensacja prądu biernego za pomocą układów P-APF (D-STATCOM)

Charakterystyki I/U kompensatorów



Uwzględniając sposób dołączenia układu i działanie



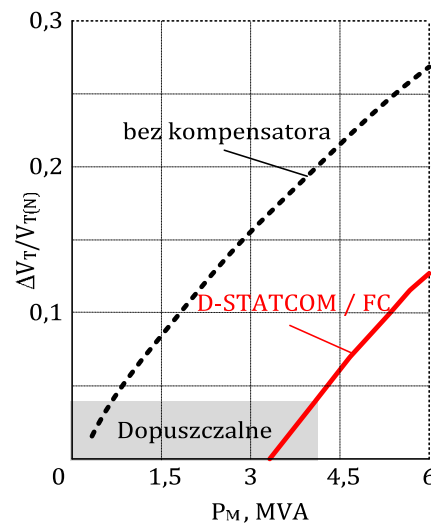
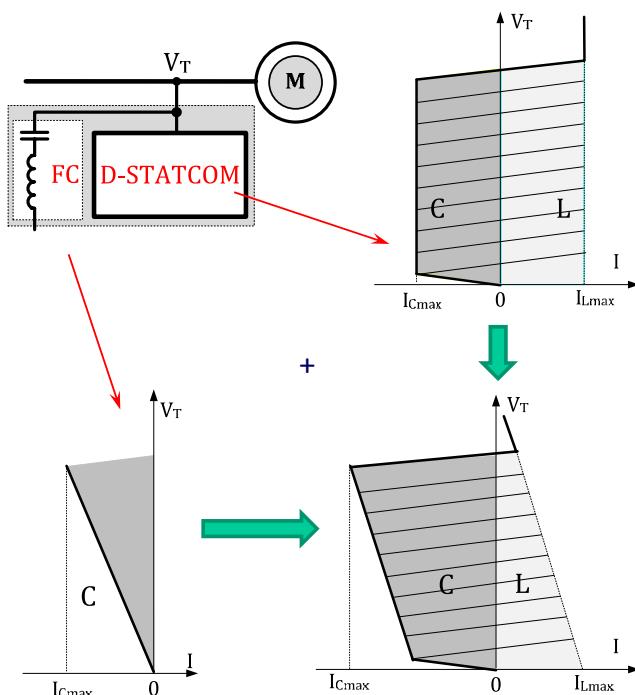
D-STATCOM umożliwia dynamicznie:

- odciążenie linii od prądów biernych,
- stabilizację napięcia przy zbyt dużym i małym obciążeniu
- podtrzymanie napięcia w następstwie przerwy zasilania przy zastosowaniu dodatkowego zasobnika (np. baterii akumulatorów)

# UE do poprawy jakości EE

## Zmniejszenie zapadów napięcia za pomocą układu D-STATCOM/FC

Rozruch silników klatkowych dużej mocy



- Na przykład:
- przepompownie rurociągów
  - przenośniki taśmowe dużej mocy

Względne zapady napięcia podczas rozruchu w funkcji mocy silnika, bez i z układem D-STATCOM/FC ( $\pm 2$ MVar)

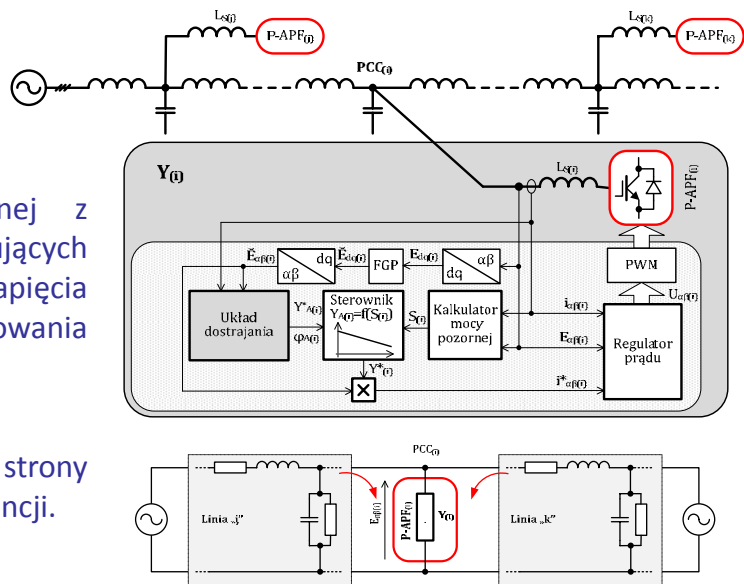
# UE do poprawy jakości EE

## Blokowanie harmonicznych napięcia za pomocą układów P-APF

Rozwiązanie do kontroli odkształcenia napięcia (jakości dostawy EE)

Schemat systemu filtracji aktywnej z rozproszonymi układami P-APF realizujących zasadę blokowania harmonicznych napięcia w punktach PCC (bocznikowania harmonicznych prądu)

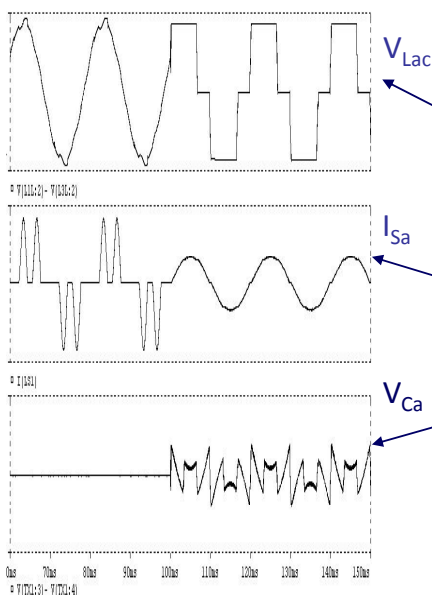
Każdy układ P-APF jest widziany od strony sieci jako dwójnik o sterowanej admittancji.



**Zalety:** bezpośrednia kontrola odkształcenia napięcia w PCC; brak problemów związanych z bilateralnym oddziaływaniem układów P-APF, prosta rozbudowa, mniejsza liczba czujników

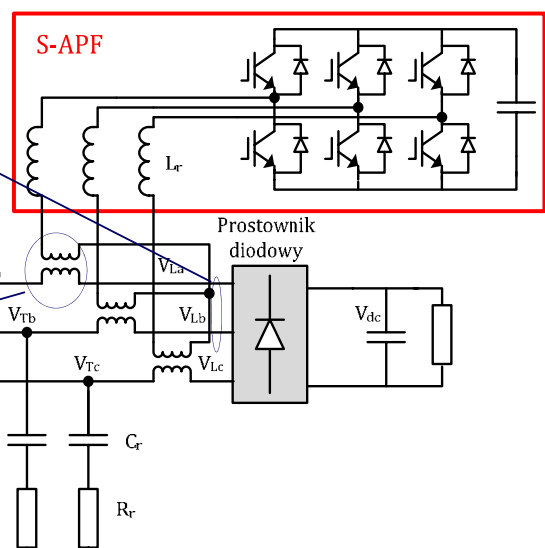
# UE do poprawy jakości EE

## Blokowanie przepływu harmonicznych prądu za pomocą S-APF



Przykładowe przebiegi prądów i napięć

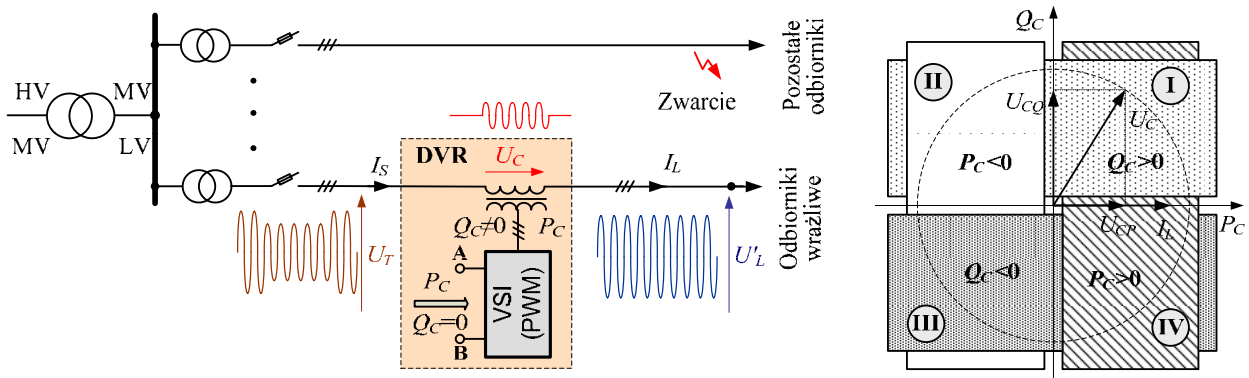
Zasada blokowania prądu  $Z_{sh} \rightarrow \infty$



Uproszczony schemat układu blokowania z układem S-APF

# UE do poprawy jakości EE

## Kompensacja zapadów napięcia – układy DVR



### Umiejscowienie obszaru pracy układu DVR w SDEE

W przypadku zaburzeń napięcia, układ **DVR** (Dynamic **V**oltage **R**estorer) w sposób dynamiczny doprowadza do odtworzenia wymaganego napięcia na zaciskach odbiornika (z wyłączeniem przerw w zasilaniu oraz odchyłeń częstotliwości).

**Właściwości układów DVR, oprócz ich topologii, w dużym stopniu determinuje przyjęta strategia sterowania**

# UE do poprawy jakości EE

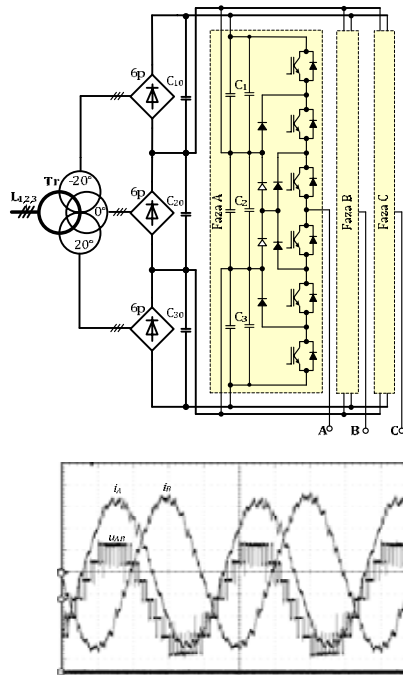
## Podstawowe strategie sterowania układami DVR

wg napięcia „sprzed zapadu” $t_{reg} \rightarrow \min$ ; $ P_C  \uparrow \uparrow$ $ U_C  \uparrow \uparrow$ ; $S_{DVR} \uparrow \uparrow$	„w fazie” z napięciem linii podczas zapadu $t_{reg} \uparrow$ ; $ P_C  \uparrow$ $ U_C  \rightarrow \min$ ; $S_{DVR} \rightarrow \min$	„z minimalną energią” pobieraną ze źródła $t_{reg} \uparrow \uparrow$ ; $ P_C  \rightarrow \min$ $ U_C  \uparrow$ ; $S_{DVR} \uparrow$



# Wybrane krajowe rozwiązania prototypowe

## Falownik 4-poziomowy 6kV/1MVA (docelowo w układzie D-STATCOM )



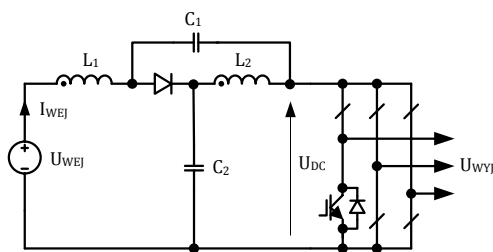
Przebiegi prądu i napięcia silnika 6kV/0,5MVA podczas prób przy obciążeniu 200 kW



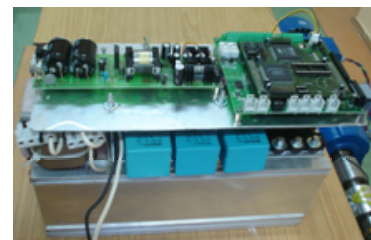
Schemat, konstrukcja oraz prądy i napięcia wyjściowe

# Wybrane krajowe rozwiązania prototypowe

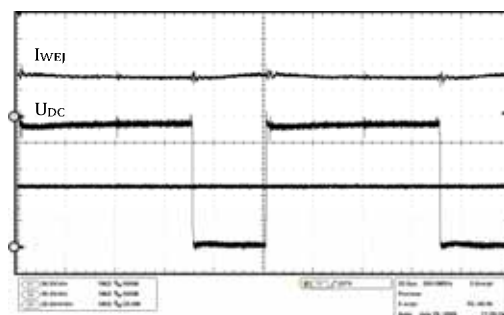
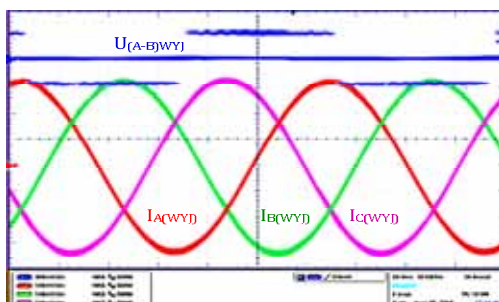
## Quasi-Z falownik do źródeł niskonapięciowych



Schemat układu



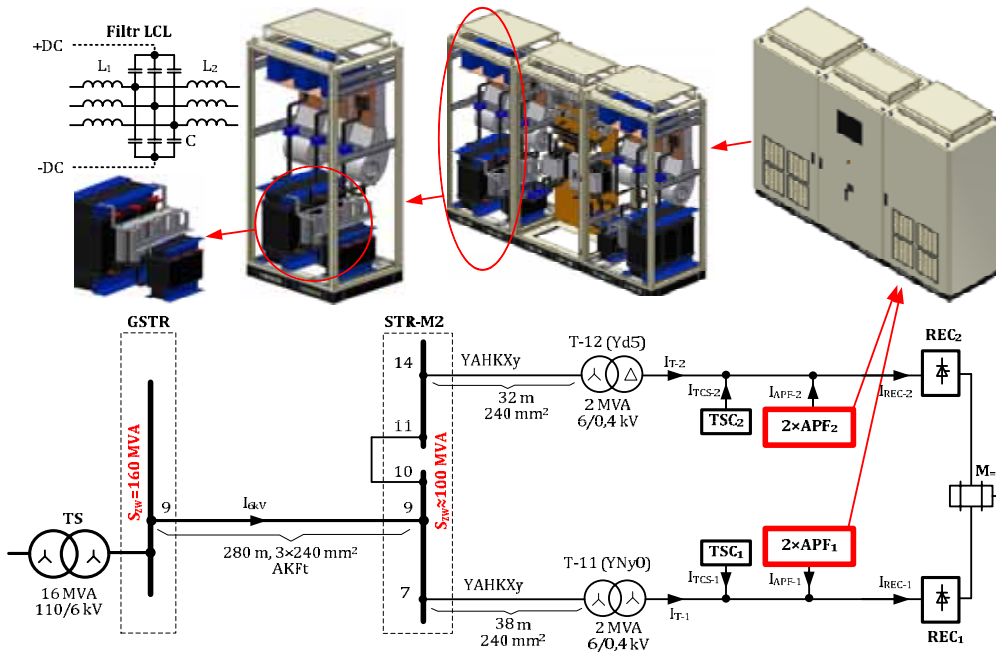
Widok prototypu laboratoryjnego



Wybrane oscylogramy prądów i napięć w układzie 3-fazowym

# Wybrane krajowe rozwiązania prototypowe

## Układ P-APF dużej mocy z filtrem sprzęgającym LCL (1)



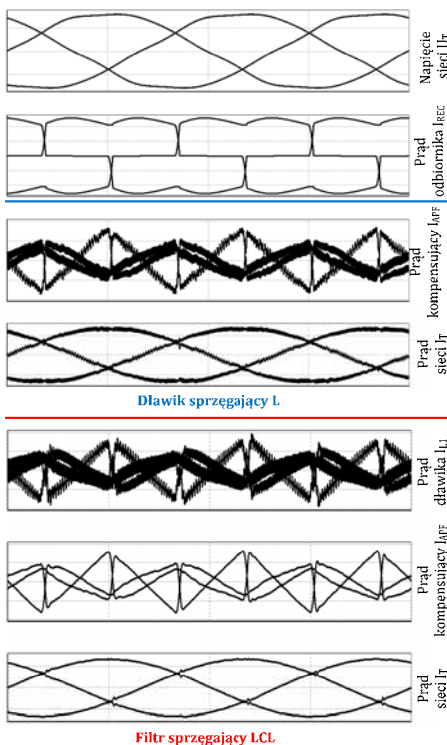
Konstrukcja i schemat połączeń P-APF w układzie zasilania maszyny wyciągowej w kopalni węgla kamiennego „Bogdanka”

35

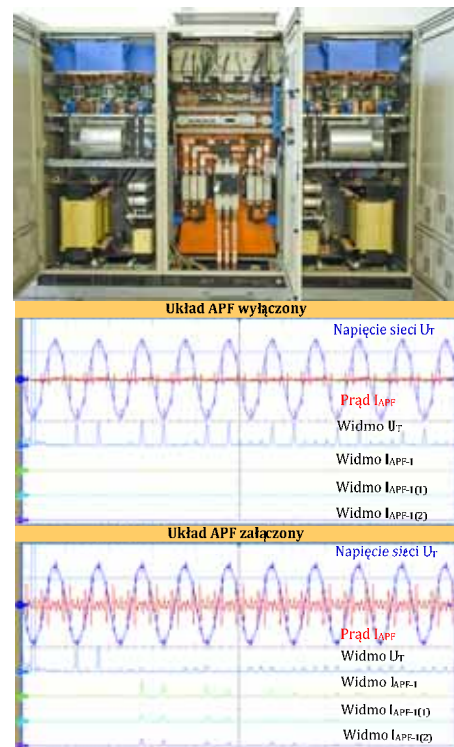
# Wybrane krajowe rozwiązania prototypowe

## Układ APF dużej mocy z filtrem sprzęgającym LCL (2)

Wyniki badań porównawczych układu z dławikiem L i z filtrem LCL



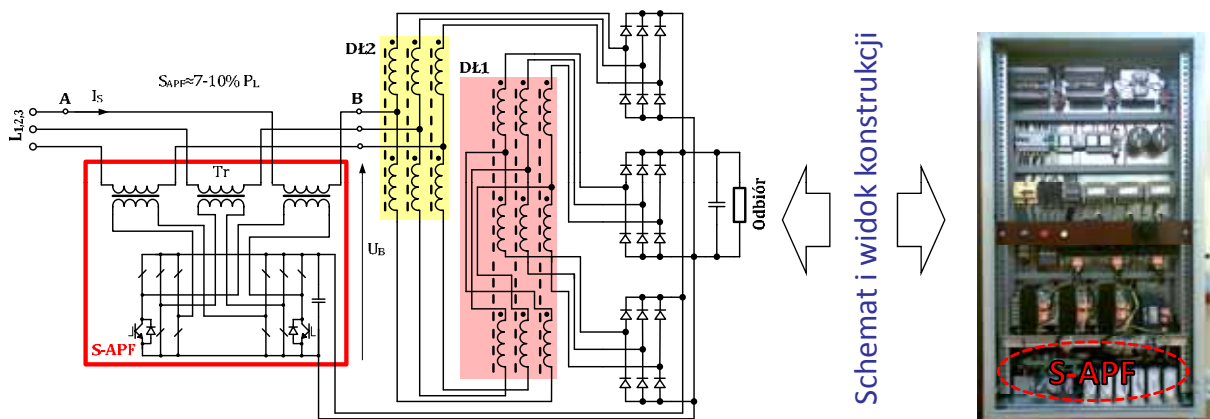
Widok układu i wyniki badań eksperymentalnych w kopalni



36

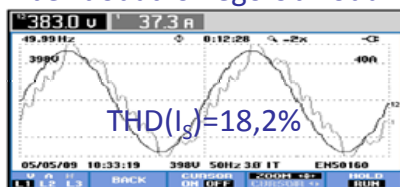
# Wybrane krajowe rozwiązania prototypowe

## Prostownnik 18-pulsowy z dławikami sprzężonymi

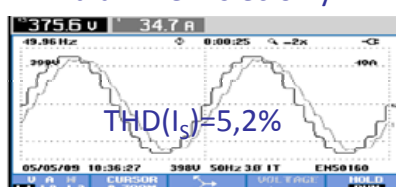


Schemat i widok konstrukcji

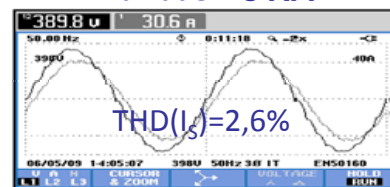
bez dodatkowego obwodu



z dławikiem sieciowym



z układem S-APF



Napięcia  $U_B$  oraz prądy sieci  $I_s$  w zależności od obwodu włączonego między węzłami A-B

37

## Podsumowanie

- ✓ Nowoczesne UE pozwalają na pełniejsze wykorzystanie istniejącej struktury SDEE, z zachowaniem a nawet poprawą dotychczasowego stanu bezpieczeństwa zasilania i jakości EE.
- ✓ Współczesne technologie energoelektroniczne przeznaczone dla SDEE zdecydowanie górują nad technologiami tradycyjnymi, opartymi o elementy biernie LC i mechaniczne urządzenia łącznikowo-sprzęgające, a nawet tyrystory konwencjonalne.
- ✓ Istotne znaczenie ma skuteczność i szybkość działania UE, co umożliwia płynną i dynamiczną regulację parametrów nadążającą za zmianami w odbiorach i w konfiguracji sieci. UE mogą też zazwyczaj realizować jednocześnie wiele funkcji związanych z kondycjonowaniem EE.
- ✓ Można się spodziewać, że wraz z rozwojem małej energetyki lokalnej oraz realizacją koncepcji zasilania rozproszonego UE spełniające różne funkcje staną się standardowym wyposażeniem urządzeń rozdzielczych.
- ✓ Autorzy mają nadzieję, że niniejszy referat okaże inspirujące działanie w poszukiwaniu niekonwencjonalnych, oryginalnych i uzasadnionych rozwiązań w omawianym obszarze.

38

