



Dr hab. inż. Robert Stala

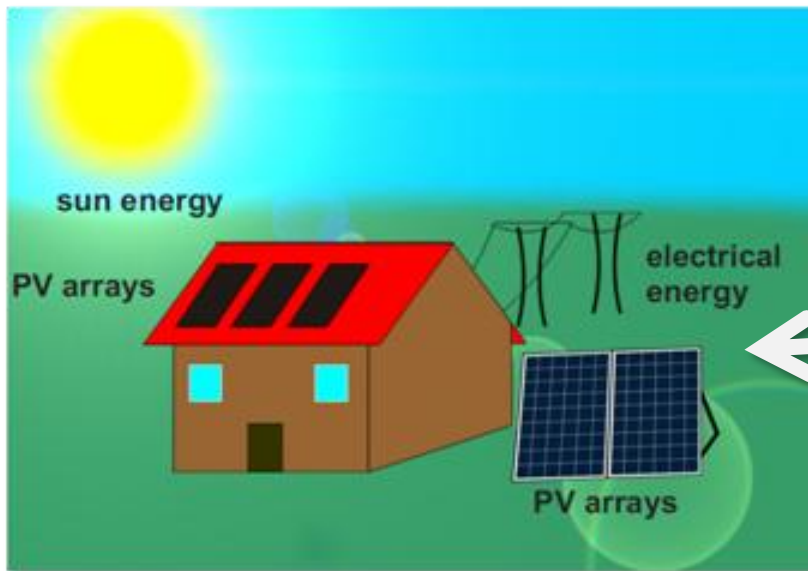
**Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie**

**Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych
E-mail: stala@agh.edu.pl**

STEROWANIE SYSTEMÓW FOTOWOLTAICZNYCH DOŁĄCZONYCH DO SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

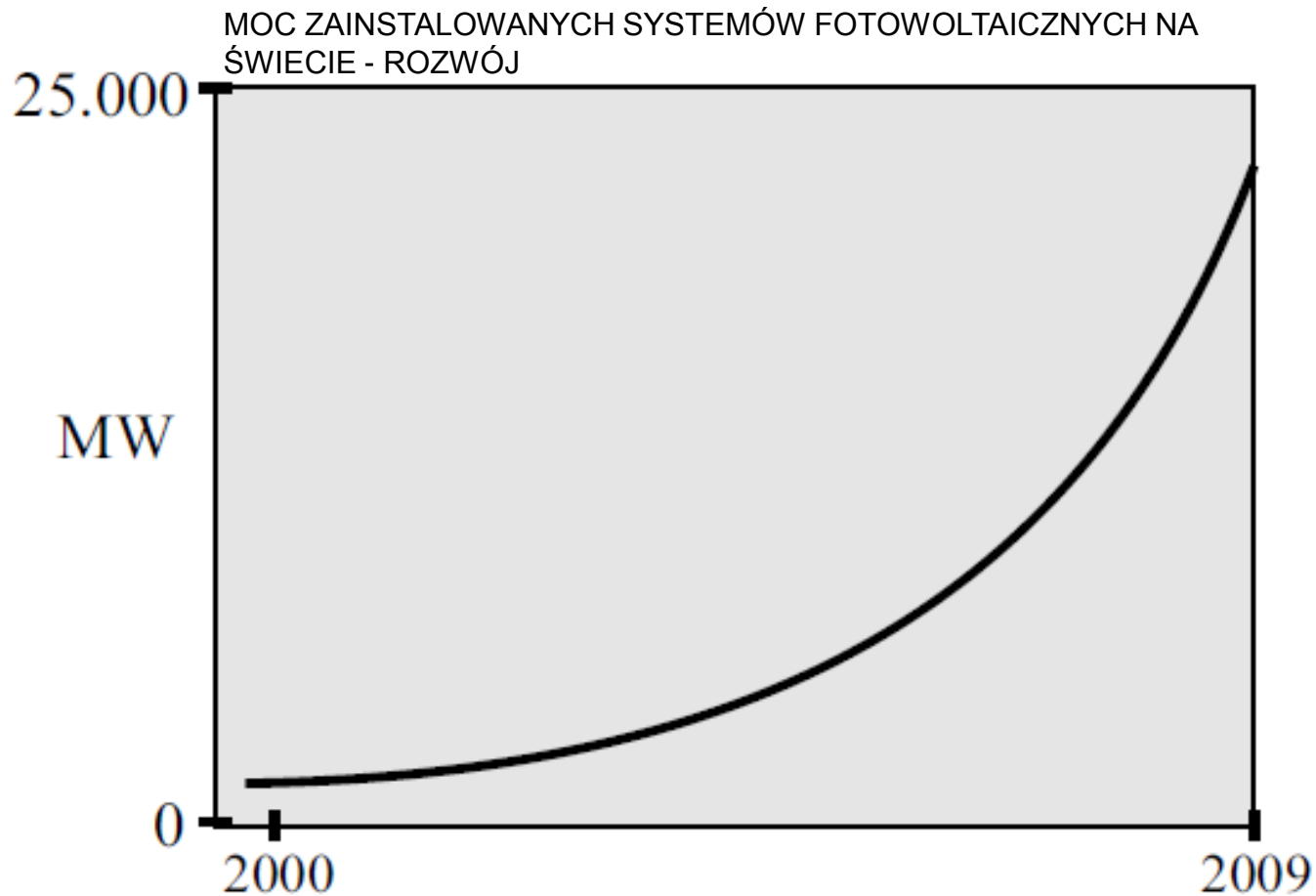
- Specyfika fotowoltaicznego (PV) źródła energii.
- Energoelektroniczny system przekształcania energii PV.
- Wymagania dla systemu PV wg – normy, efektywność energetyczna i bezpieczeństwo.
- Algorytmy sterowania systemów PV – wyniki badań autora (i zespołu) zrealizowane w Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie na tle badań światowych.

OGNIWO FOTOWOLTAICZNE – PRZEMIANA ENERGII PROMIENIOWANIA NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ

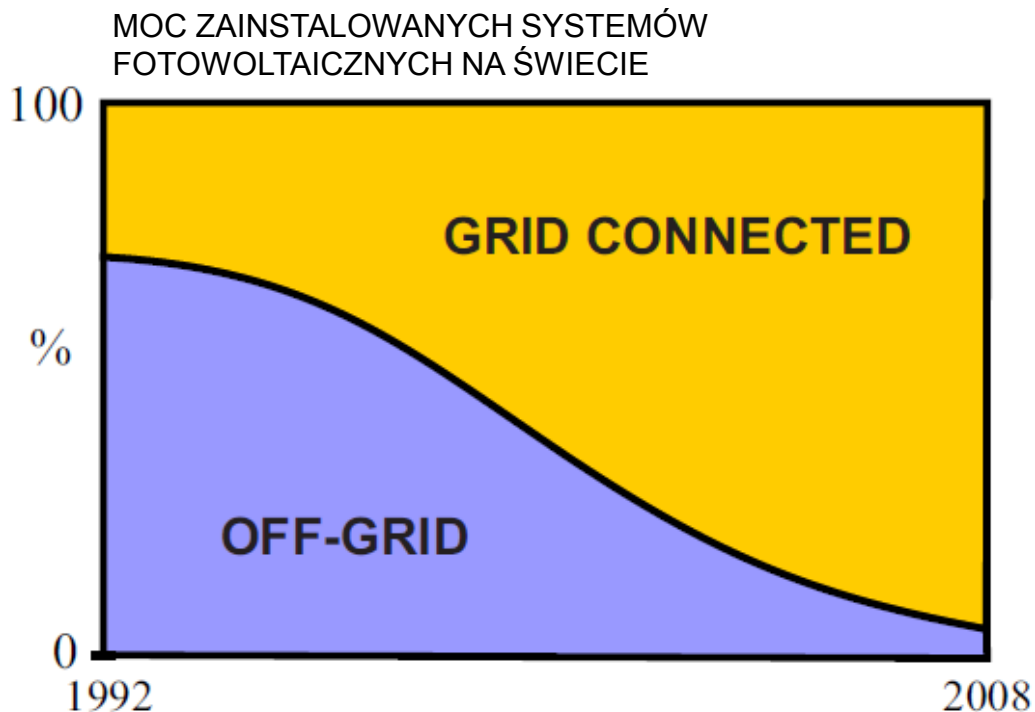


Roczna energia promieniowania słonecznego znacznie przekracza zużycie energii.

MOC ZAINSTALOWANYCH OGNIW PV



SYSTEMY AUTONOMICZNE I DOŁĄCZONE DO SIECI

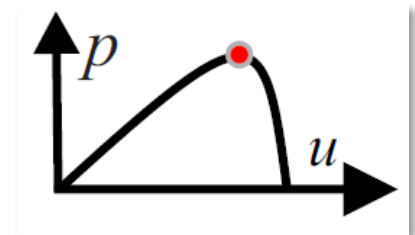
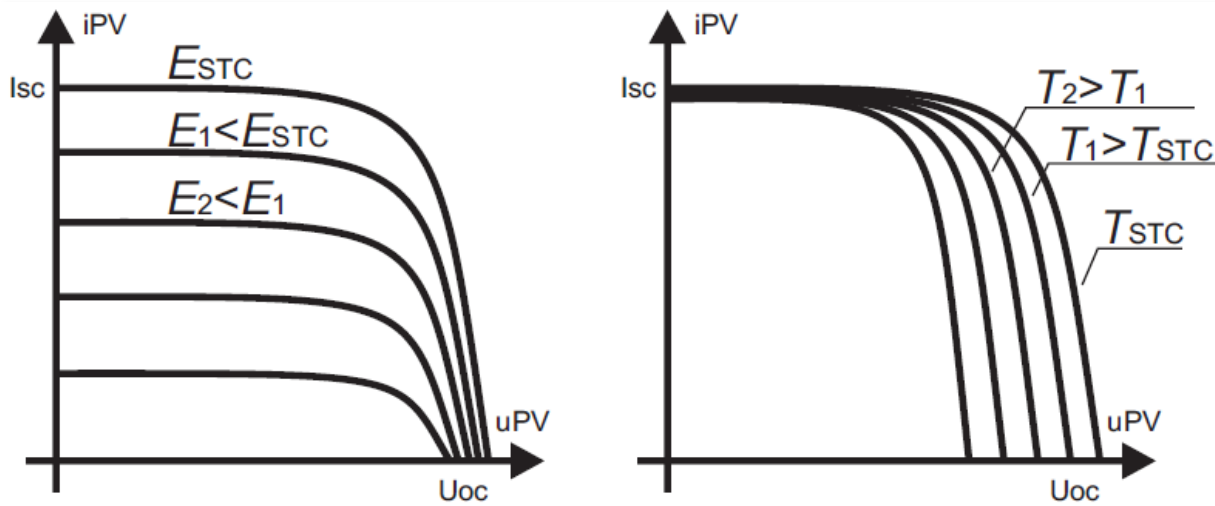


PANELE FOTOWOLTAICZNE – SPECYFIKA ŹRÓDŁA ENERGII

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.



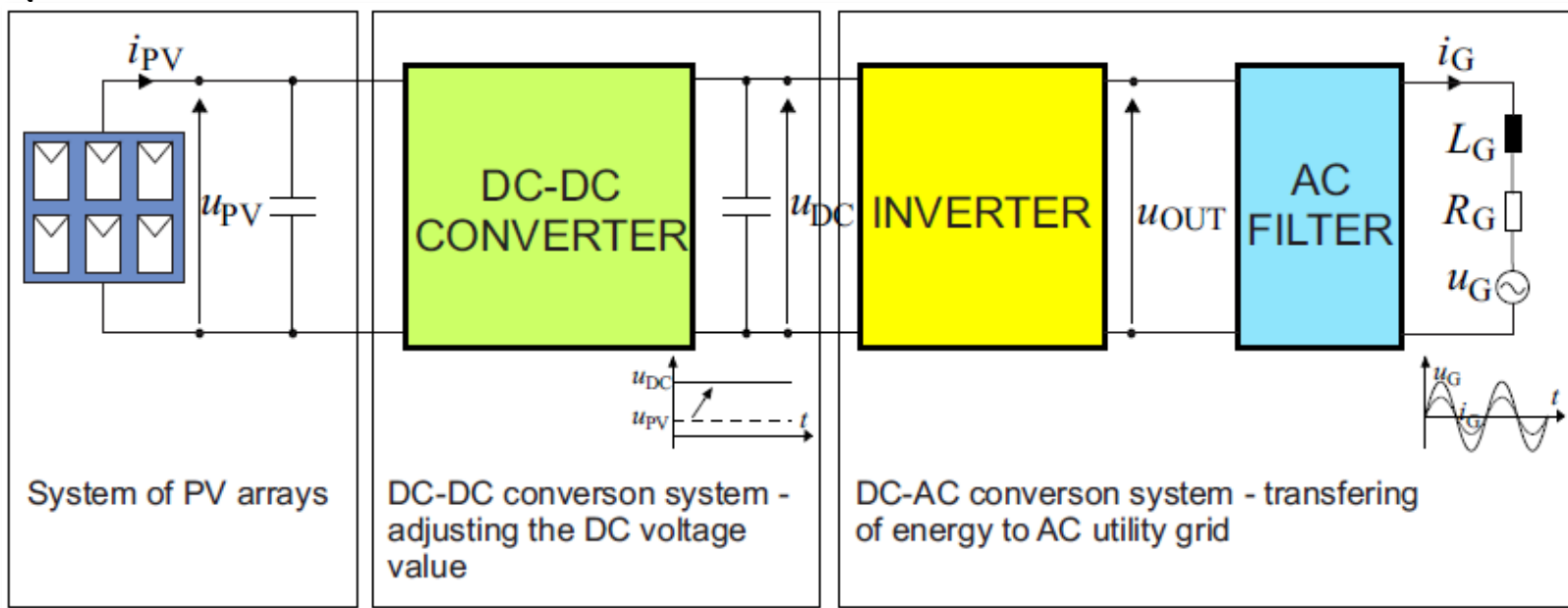
SPECYFICZNA CHARAKTERYSTYKA PRĄDOWO NAPIĘCIOWA:



SYSTEM PV DOŁĄCZONY DO SIECI

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

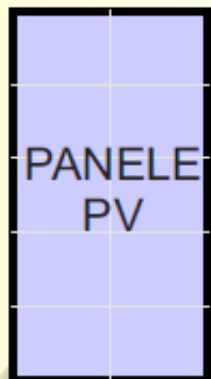
JEDNA Z TYPOWYCH KONFIGURACJI PRZEKSZTAŁTNIKÓW W SYSTEMIE FOTOWOLTAICZNYM DOŁĄCZONYM DO SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ:



SYSTEM PV DOŁĄCZONY DO SIECI

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

NAPIĘCIE
STAŁE



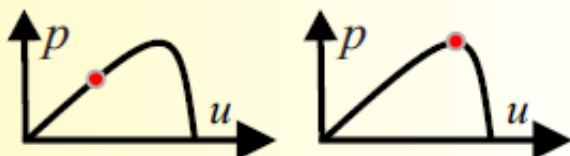
PRZEKSZTAŁTNIKI
ENERGOELEKTRONICZNE

NAPIĘCIE
PRZEMIENNE

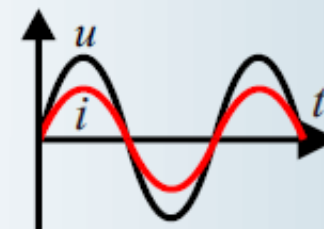
SIEĆ AC



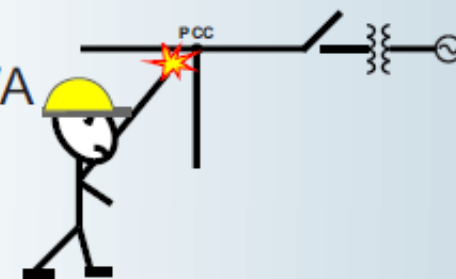
POTRZEBA
MAKSYMALNEGO
WYKORZYSTANIA
ŹRÓDŁA ENERGII



WYMAGANIA
JAKOŚCI ENERGII



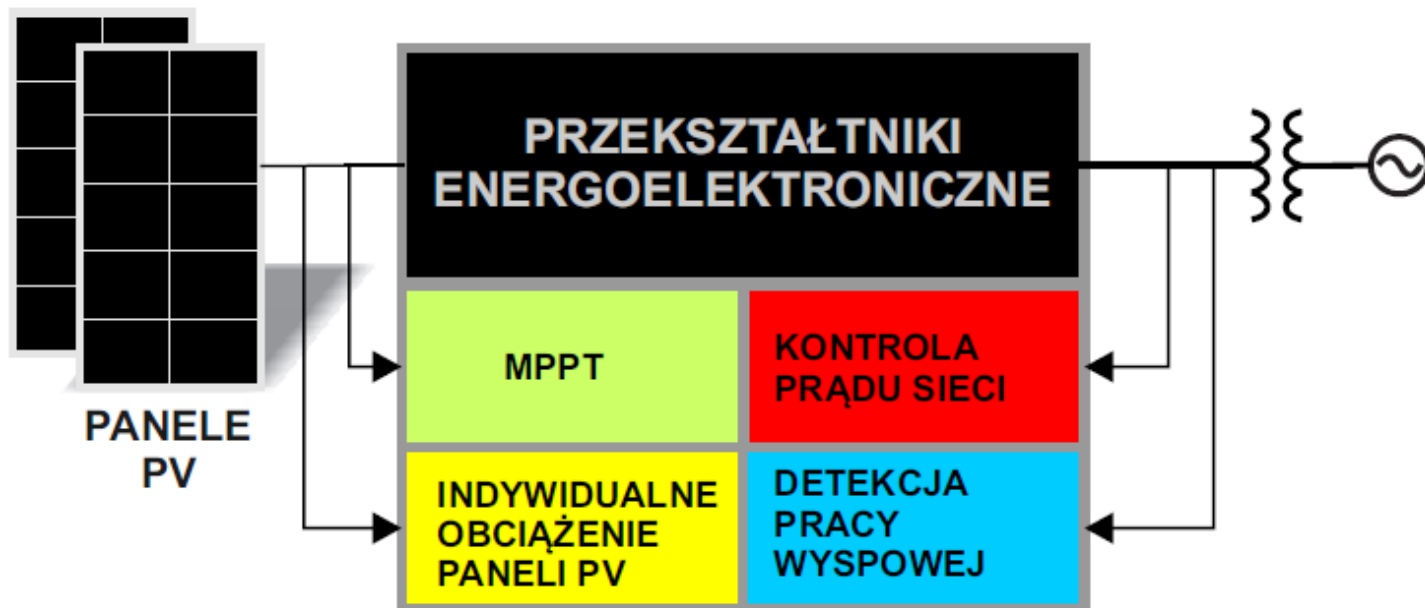
WYMAGANIA
BEZPIECZEŃSTWA



SYSTEM PV DOŁĄCZONY DO SIECI

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

ALGORYTMY STEROWANIA omawiane w prezentacji



Normy i standardy

- LIMITY HARMONICZNYCH PRĄDU:

- IEC 61000-3-2 *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limit: harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*
- IEC 61000-3-12 *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase*
- EN 61727 *Systemy fotowoltaiczne (PV) -- Charakterystyki uniwersalnych złączy standardowych (Photovoltaic (PV) systems. Characteristics of the utility interface). <10 kVA*
- UL 1741-1999 *Standard for Static Inverters and Charge Controllers for Use in Photovoltaic Power Systems.*

- MONITOROWANIE NAPIĘCIA I CZĘSTOTLIWOŚCI SIECI, DETEKCJA PRACY WYSPWEJ:

- EN 50438:2007 *Requirements for the connection of micro-generators in parallel with public low-voltage distribution networks*

- LIMIT SKŁADOWEJ STAŁEJ PRĄDU SIECI, WSPÓŁCZYNNIK MOCY:

- EN 61727

- MPPT

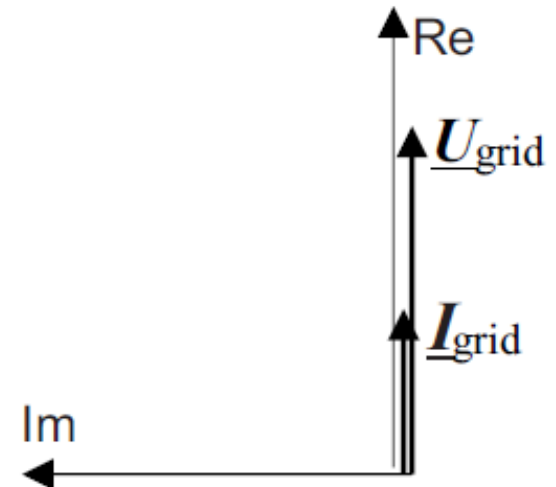
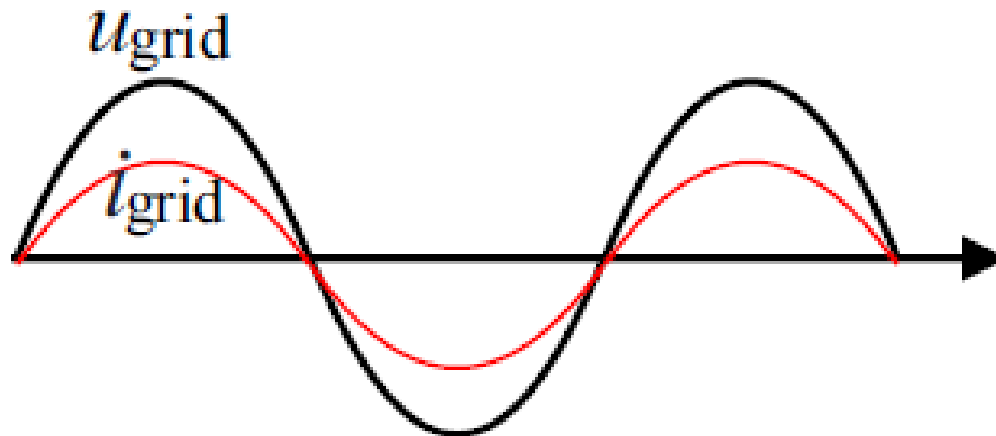
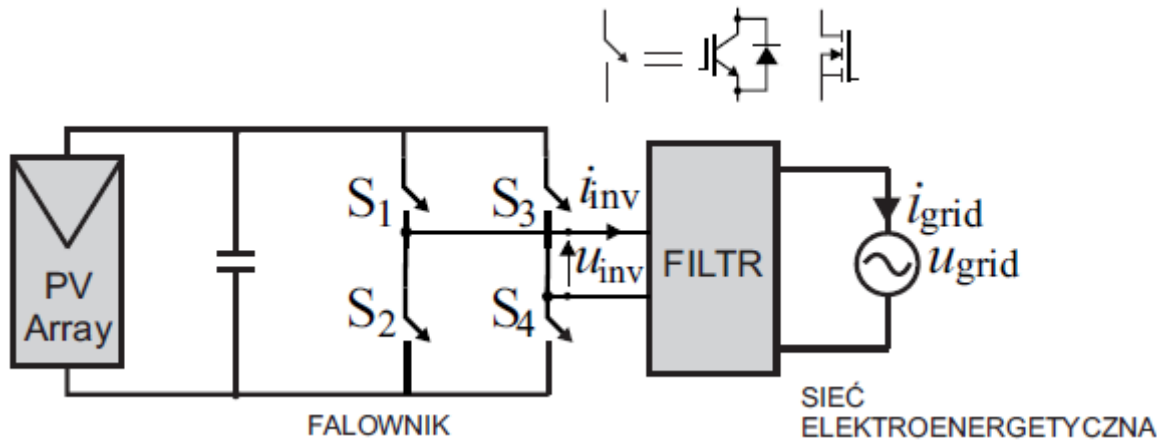
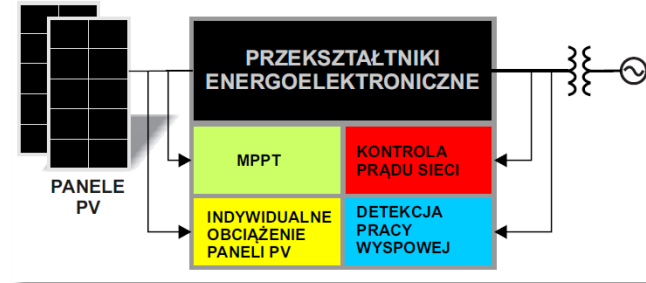
- EN 50530:2010 *Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters*



STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO – KONTROLA PRĄDU SIECI

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

MINIMUM MOCY BIERNEJ I ODKSZTAŁCENŃ PRĄDU

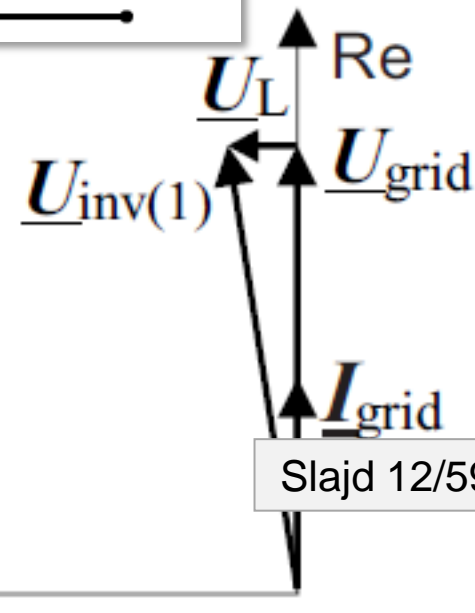
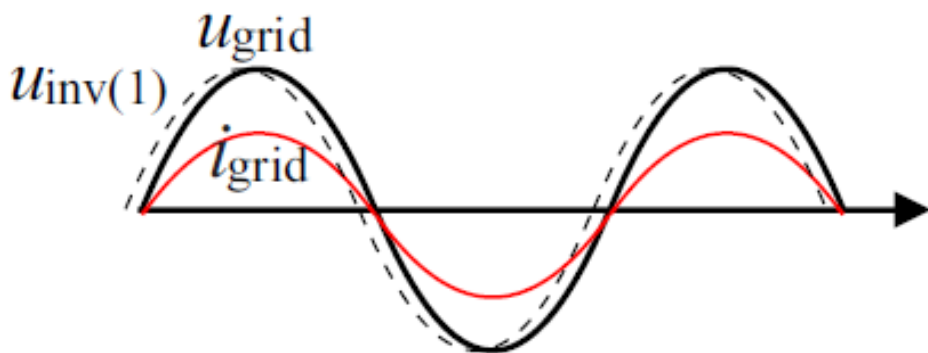
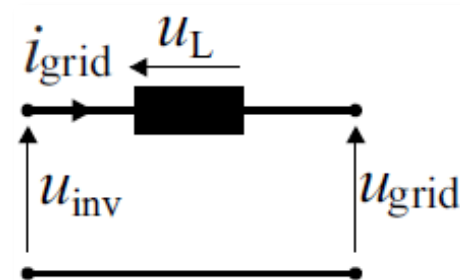
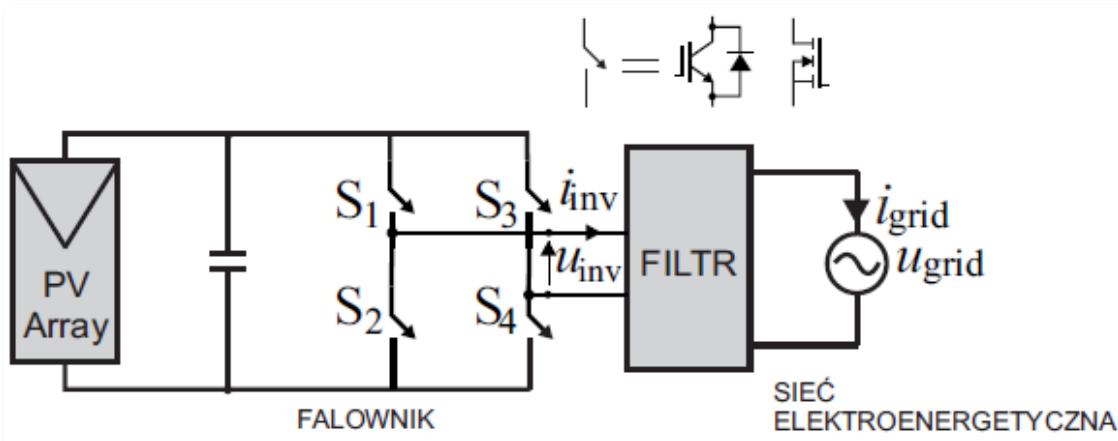
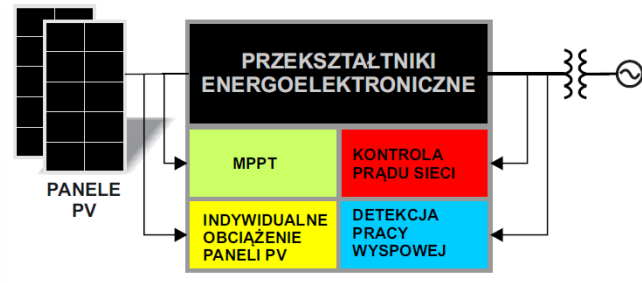


STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO – KONTROLA PRĄDU SIECI

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

CEL STEROWANIA

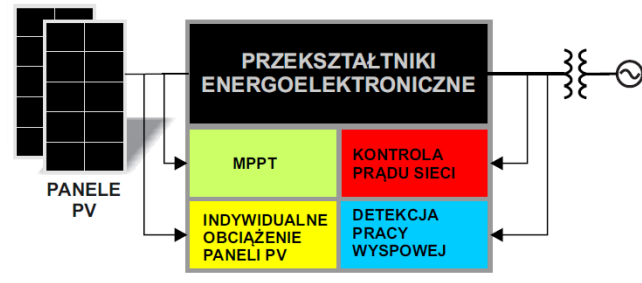
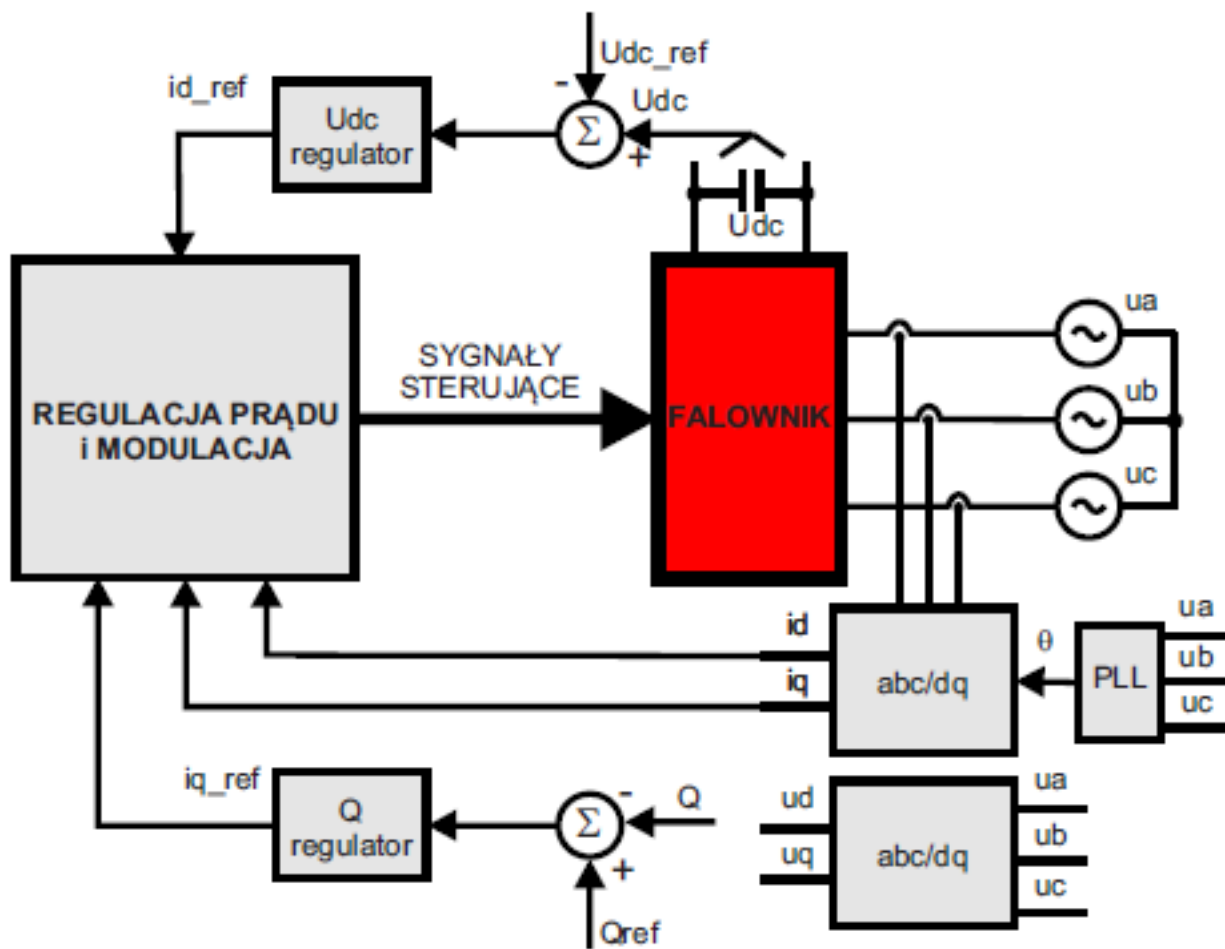
MINIMUM MOCY BIERNEJ I ODKSZTAŁCEN PRĄDU:
Przykład: NAPIĘCIE FALOWNIKA dla $PF=P/S \approx 1$ i filtra AC typu L:



STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO – KONTROLA PRĄDU SIECI

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

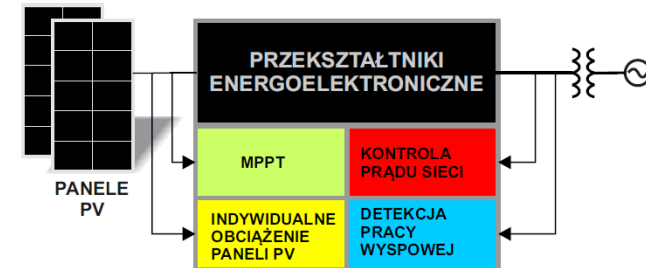
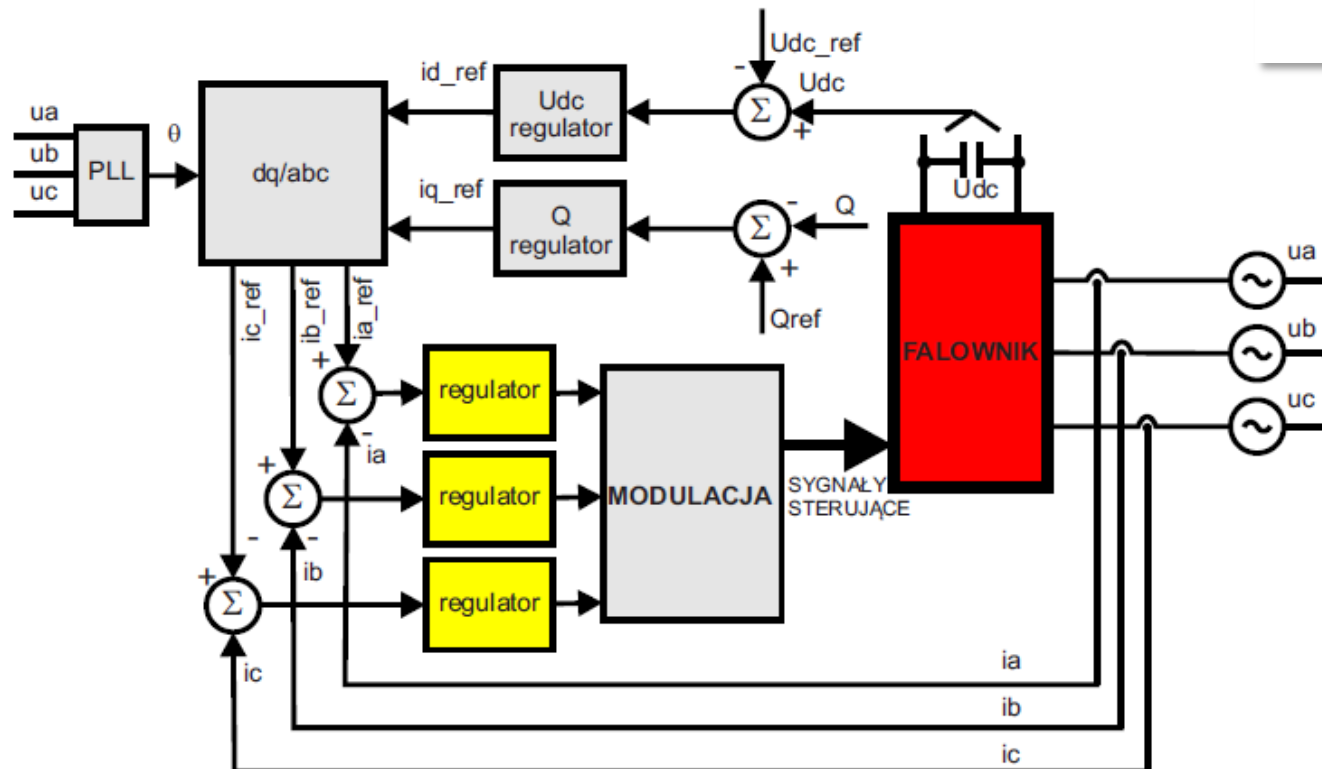
KONCEPCJE UKŁADU REGULACJI



STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO – KONTROLA PRĄDU SIECI

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

KONCEPCJE UKŁADU REGULACJI



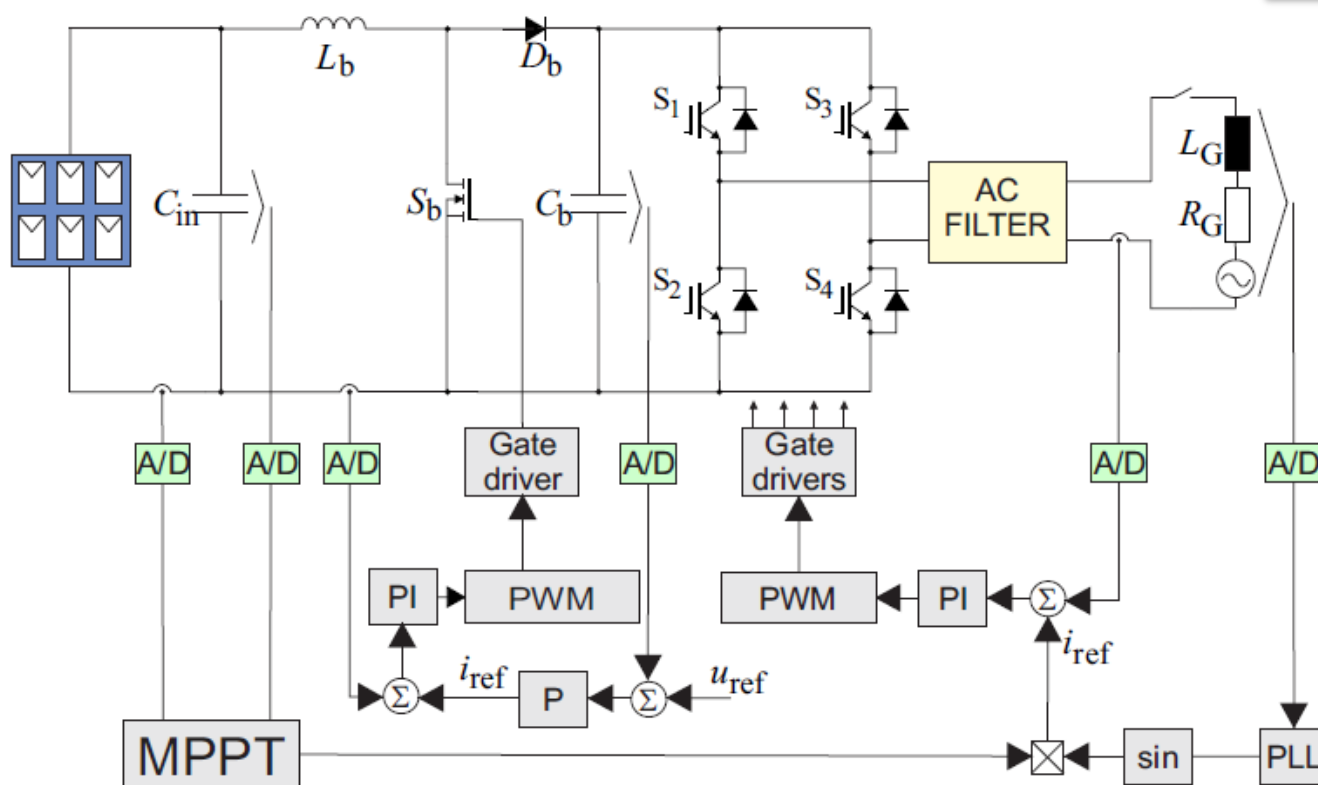
Slajd 14/59

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO – KONTROLA PRĄDU SIECI

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

KONCEPCJE UKŁADU REGULACJI

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



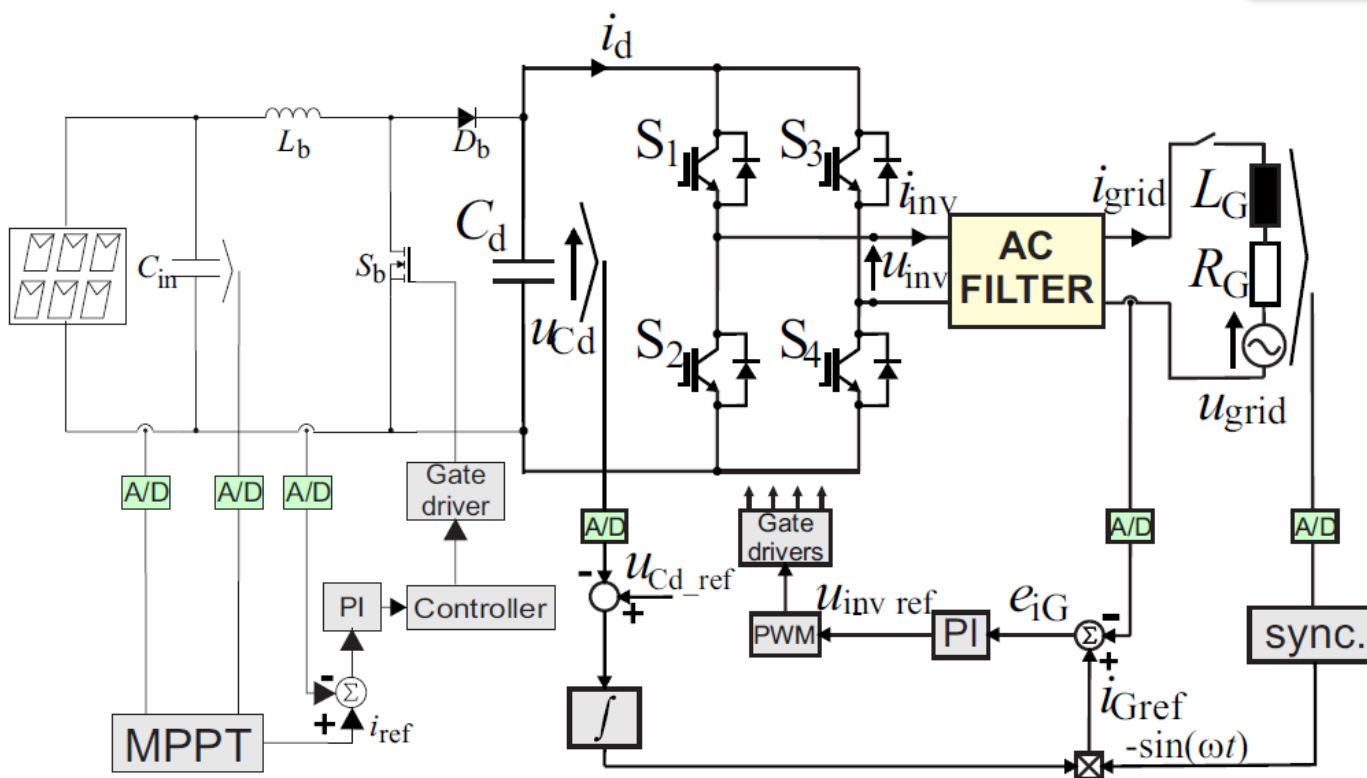
Slajd 15/59

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO – KONTROLA PRĄDU SIECI

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

KONCEPCJE UKŁADU REGULACJI

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



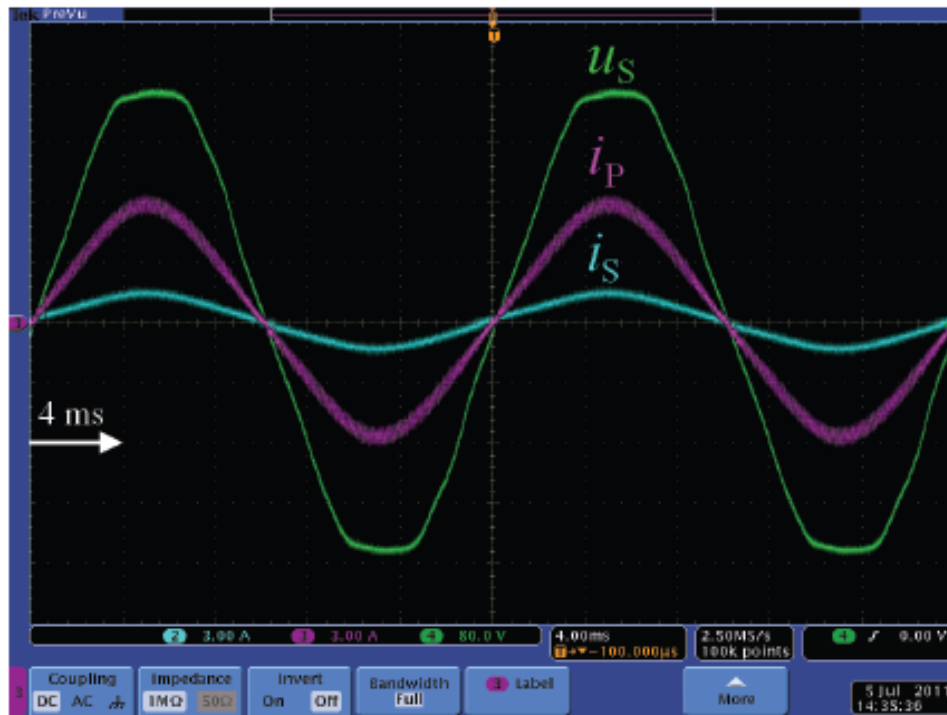
Slajd 16/59

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO – KONTROLA PRĄDU SIECI

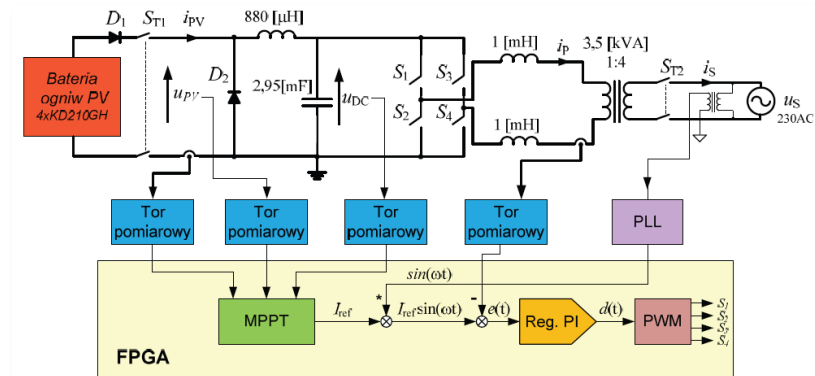
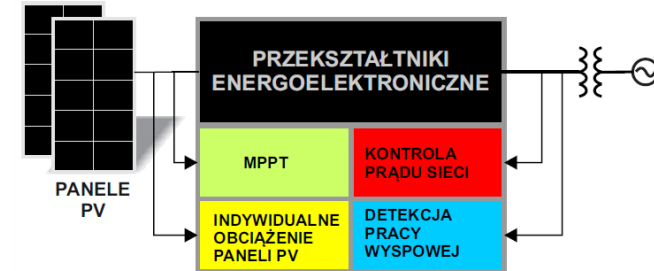
Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

WYNIKI EKSPERYMENTALNE

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



Rys. 11. Zwrot energii do sieci elektroenergetycznej – stan ustalony: prąd strony wtórnej transformatora (prąd sieci) – i_s (CH2, 3A/dz), prąd strony pierwotnej transformatora – i_p (CH3, 3A/dz), napięcie sieci - u_s (CH4, 80V/dz)

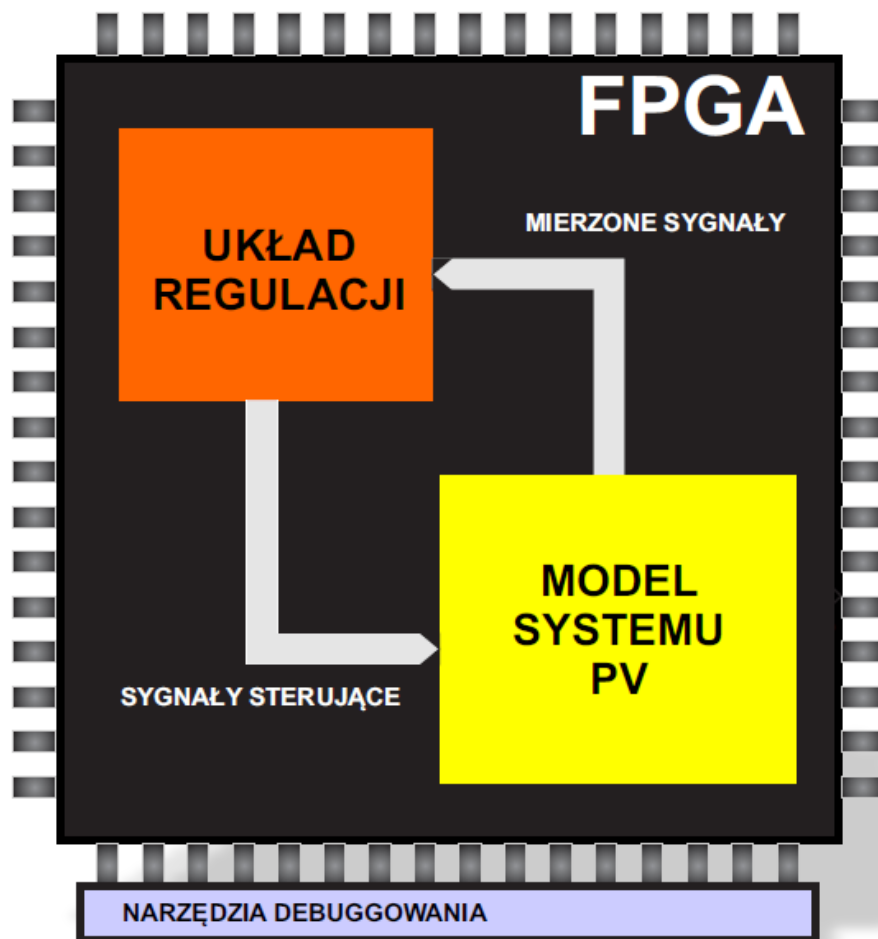


Rys. 1. Schemat układu

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO – KONTROLA PRĄDU SIECI

WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535,
„Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

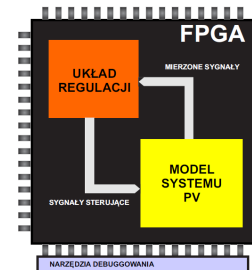
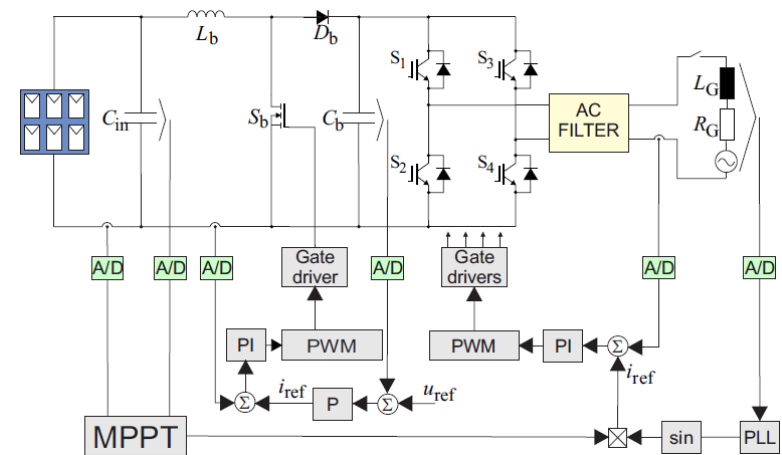
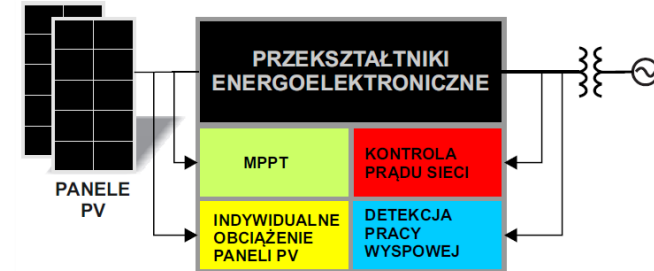
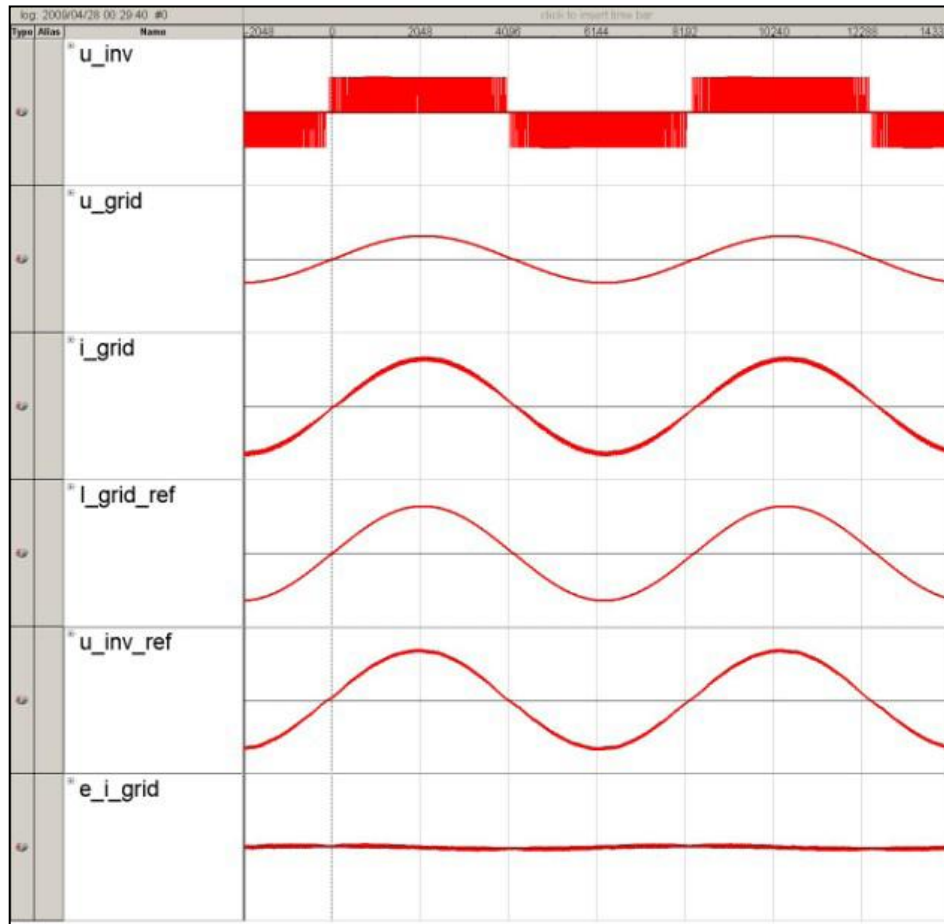


STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO – KONTROLA PRĄDU SIECI

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



Slajd 19/59

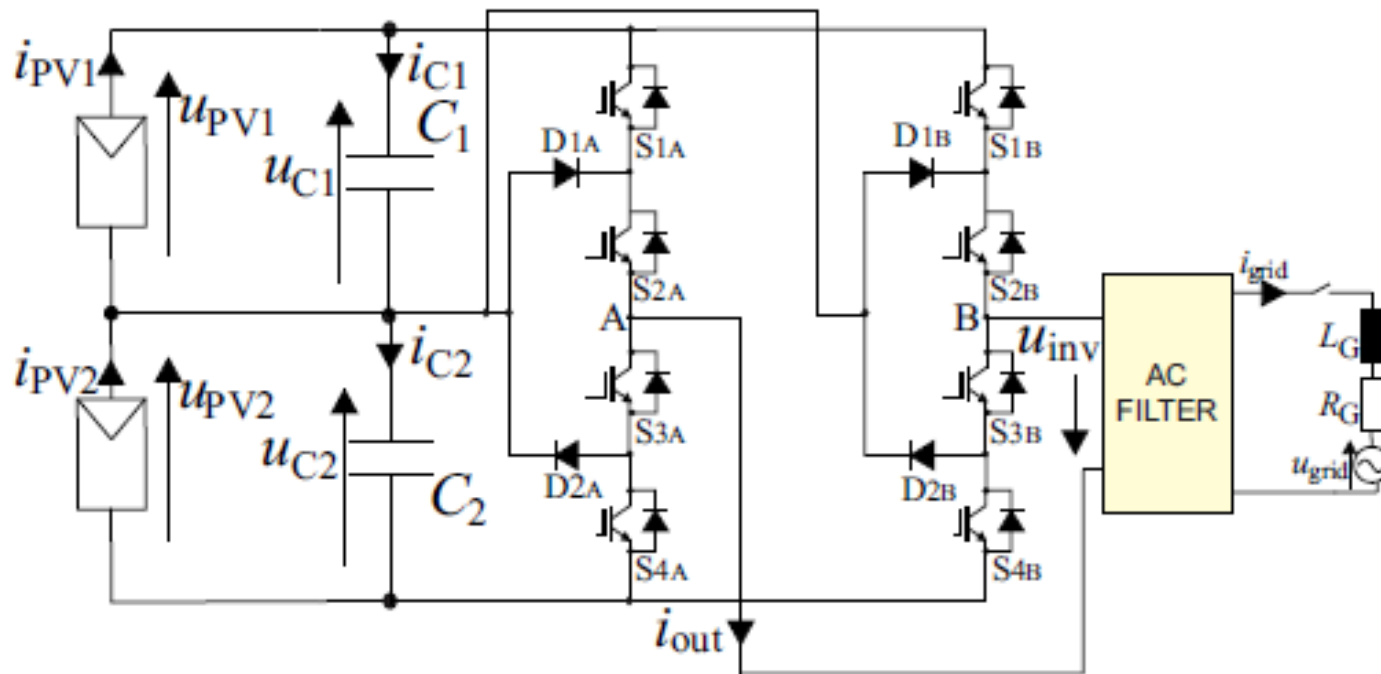
STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

– SYSTEM Z FALOWNIKIEM MOSTKOWYM DIODE-CLAMPED

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

- KONTROLA PRĄDU SIECI
- INDYWIDUALNA KONTROLA MOCY PANELI

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



Slajd 20/59

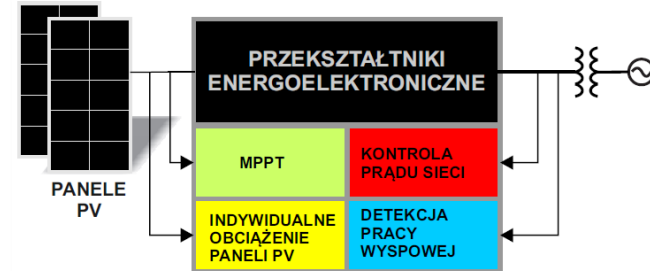
STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

– SYSTEM Z FALOWNIKIEM MOSTKOWYM DIODE-CLAMPED

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

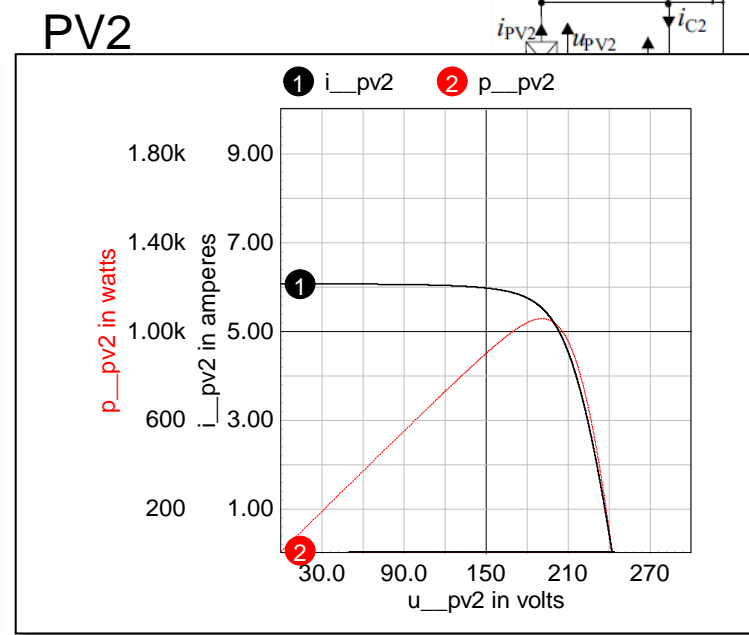
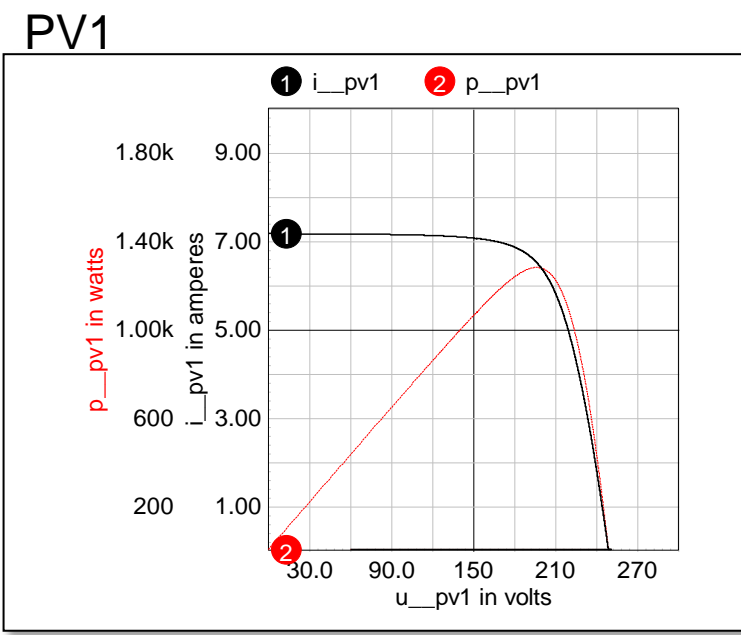
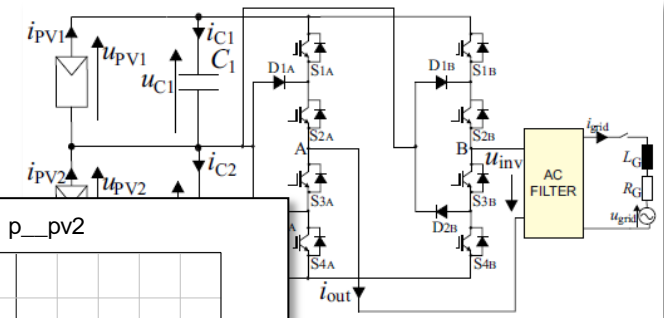
- KONTROLA PRĄDU SIECI
- INDYWIDUALNA KONTROLA MOCY PANELI

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



CEL STEROWANIA:

- OBA PANELE PRACUJĄ Z MPP
- FALOWNIK KSZTAŁTUJE PRĄD SIECI



Źródło: R. Stala: “Individual MPPT of Photovoltaic Arrays with Use of Single-Phase Three-Level Diode-Clamped Inverter”, *International Symposium on Industrial Electronics IEEE ISIE 2010*, 4-7 July 2010, Bari, Italy, pp. 3456-3462.

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

– SYSTEM Z FALOWNIKIEM MOSTKOWYM DIODE-CLAMPED

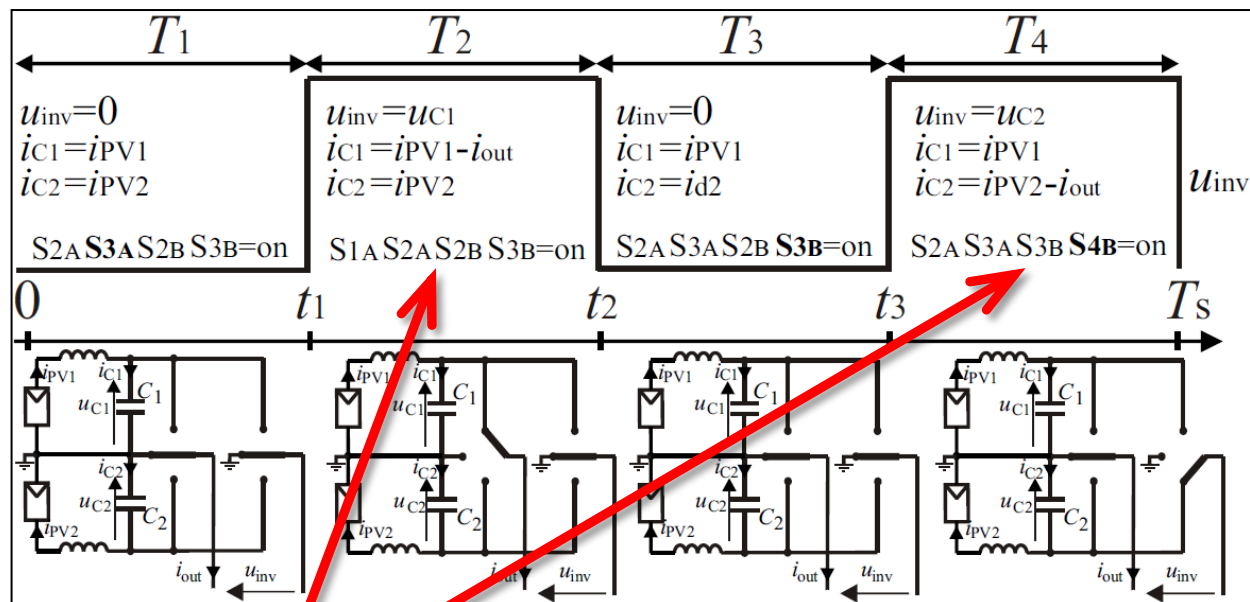
Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

- KONTROLA PRĄDU SIECI
- INDYWIDUALNA KONTROLA MOCY PANELI

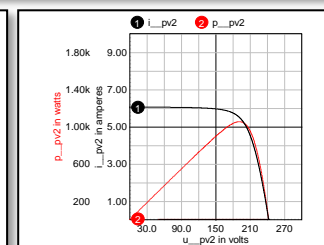
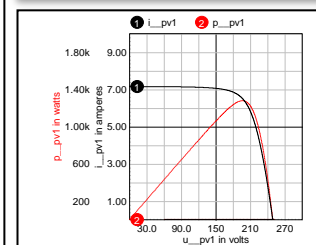
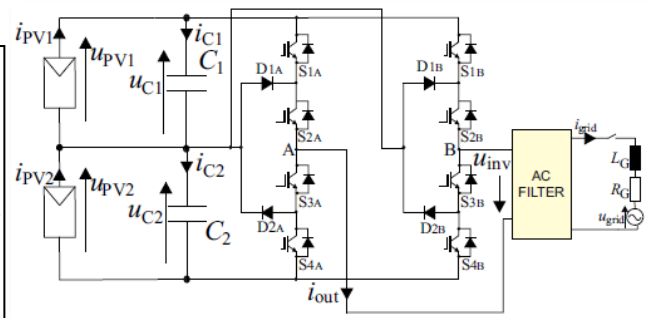
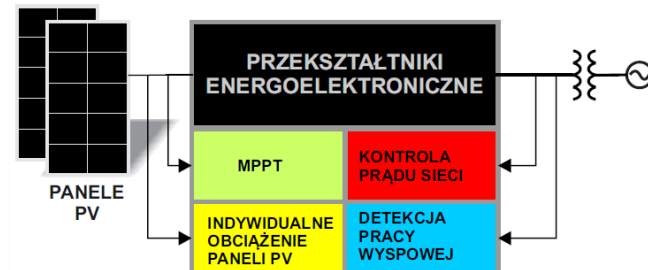
Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.

CEL STEROWANIA:

- OBA PANELE PRACUJĄ Z MPP
- FALOWNIK KSZTAŁTUJE PRĄD SIECI



PWM – TEN SAM STAN $u_{inv}=u_{C1}$ oraz $u_{inv}=u_{C2}$. Czas rozładowania źródeł PV odpowiada stosunkowi ich mocy.



STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

– SYSTEM Z FALOWNIKIEM MOSTKOWYM DIODE-CLAMPED

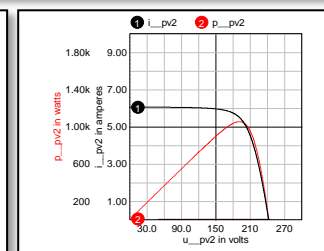
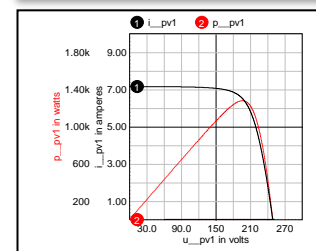
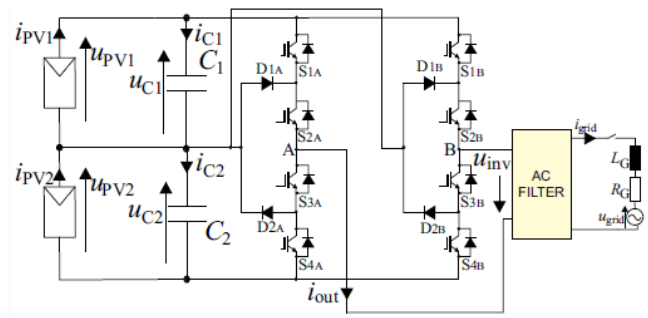
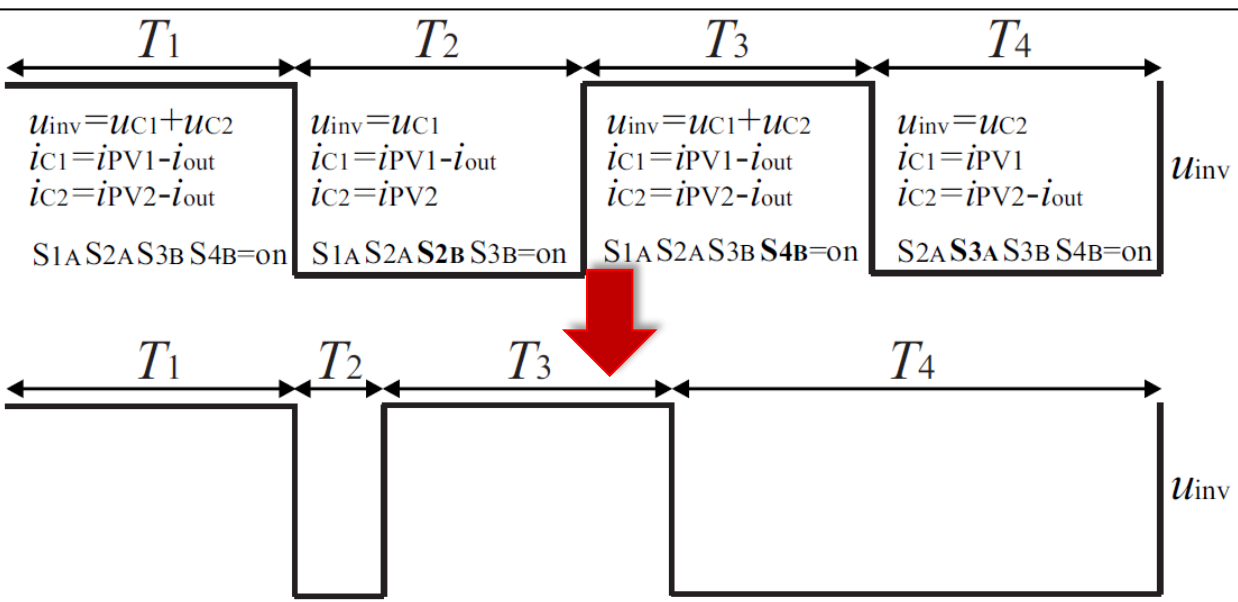
Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

- KONTROLA PRĄDU SIECI
- INDYWIDUALNA KONTROLA MOCY PANELI

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.

CEL STEROWANIA:

- OBA PANELE PRACUJĄ Z MPP
- FALOWNIK KSZTAŁTUJE PRĄD SIECI



Źródło: R. Stala: “Individual MPPT of Photovoltaic Arrays with Use of Single-Phase Three-Level Diode-Clamped Inverter”, International Symposium on Industrial Electronics IEEE ISIE 2010, 4-7 July 2010, Bari, Italy, pp. 3456-3462.

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

– SYSTEM Z FALOWNIKIEM MOSTKOWYM DIODE-CLAMPED

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

- KONTROLA PRĄDU SIECI
- INDYWIDUALNA KONTROLA MOCY PANELI

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.

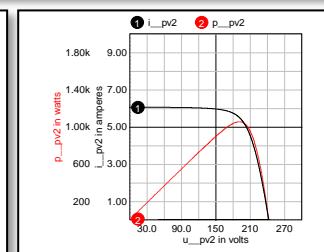
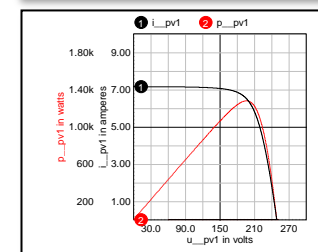
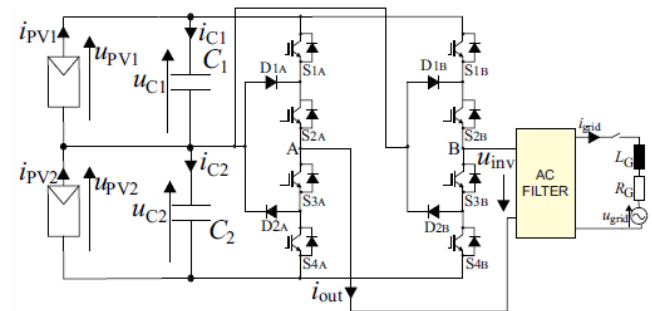
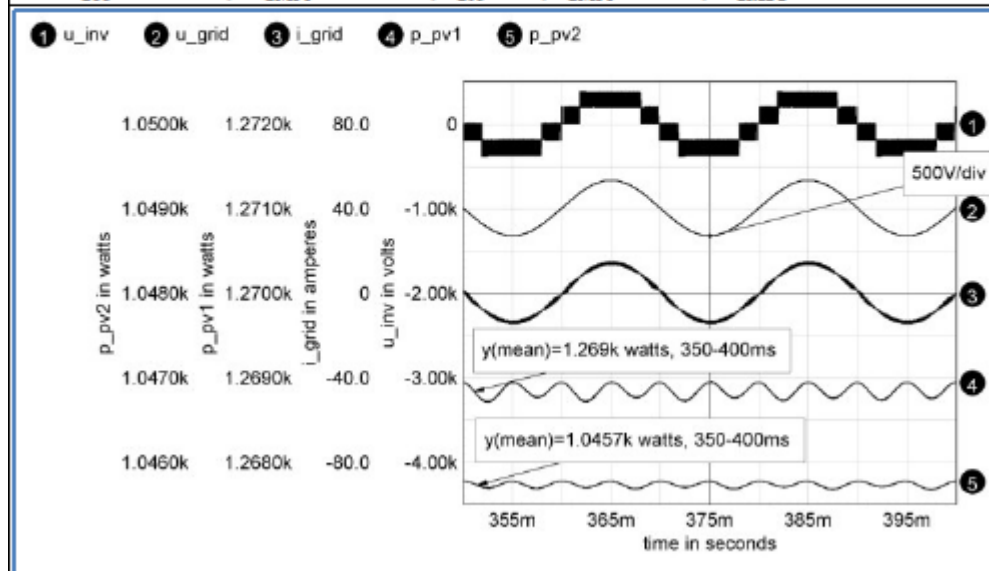
CEL STEROWANIA:

- OBA PANELE PRACUJĄ Z MPP
- FALOWNIK KSZTAŁTUJE PRĄD SIECI



Conditions:

- different irradiation of both arrays,
- implemented special control of power of arrays,
- $U_{1oc}=253.3V$, $U_{1MPP}=196.4V$, $I_{1sc}=7.1A$, $I_{1MPP}=6.5A$, $P_{1MPP}=1.277kW$,
- $U_{2oc}=246.8V$, $U_{2MPP}=191.4V$, $I_{2sc}=6A$, $I_{2MPP}=5.5A$, $P_{2MPP}=1.052kW$.



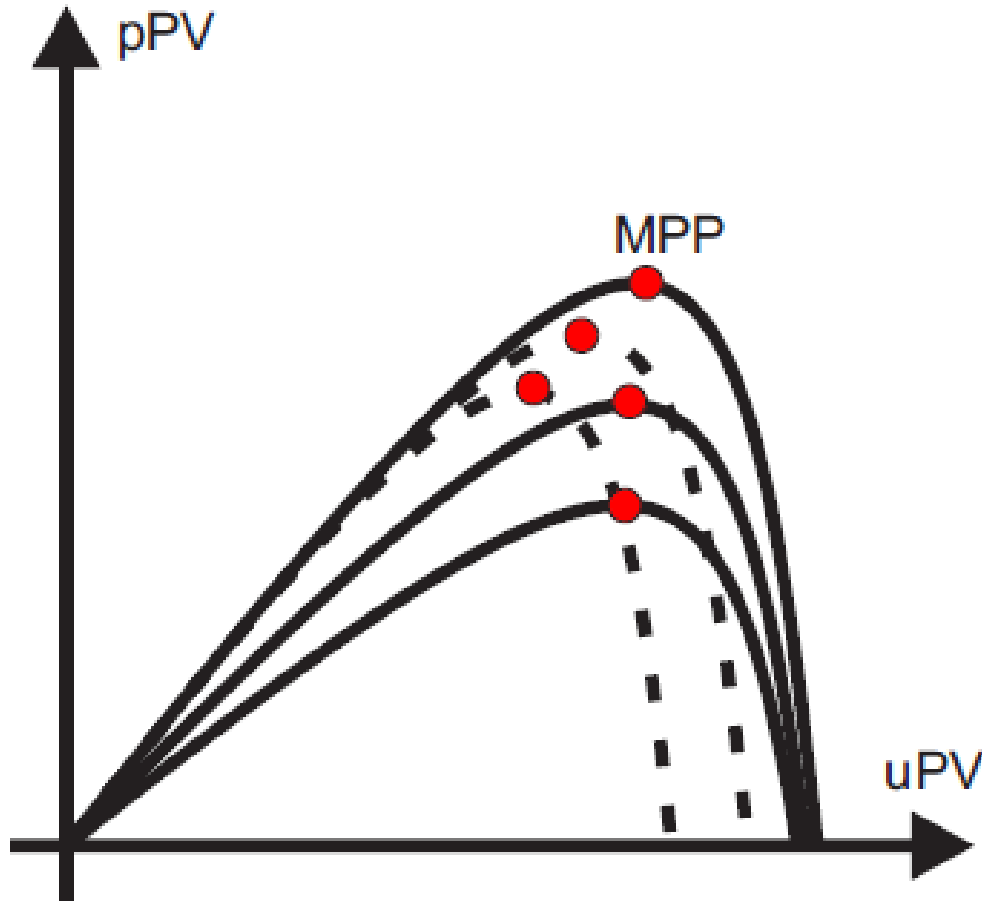
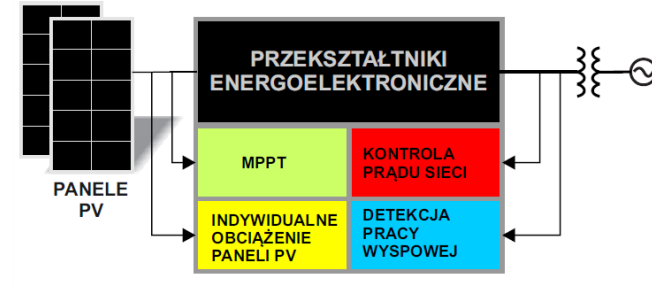
Slajd 24/59

Źródło: R. Stala: “Individual MPPT of Photovoltaic Arrays with Use of Single-Phase Three-Level Diode-Clamped Inverter”, *International Symposium on Industrial Electronics IEEE ISIE 2010*, 4-7 July 2010, Bari, Italy, pp. 3456-3462.

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV



MPPT USTALA WARTOŚĆ PRĄDU SIECI (LUB INNYCH OBCIĄŻEŃ) NA POZIOMIE MAKSYMALNEJ MOCY PANELI PV,

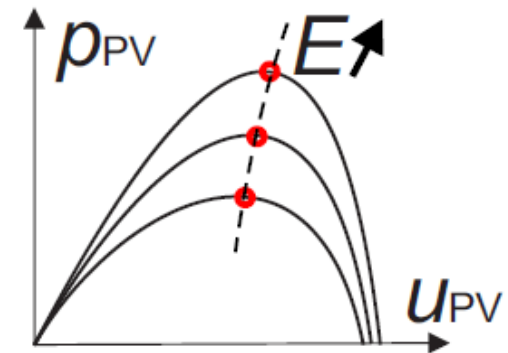
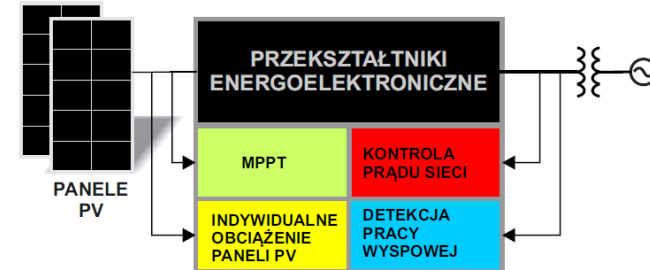
STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

Popularne techniki MPPT

- open-circuit voltage
- short circuit current,
- perturb and observe (P&O)
- hill climbing (HC),
- incremental conductance (INCD),
- ripple correlation control (RCC)
- fuzzy-logic
- neural-network

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.



STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

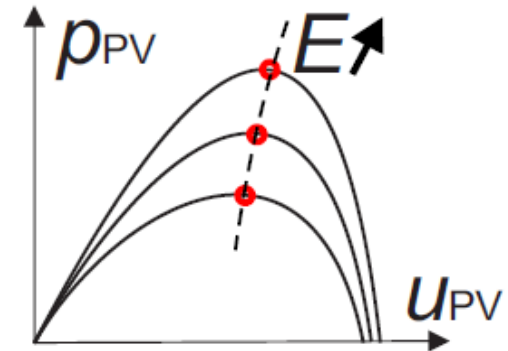
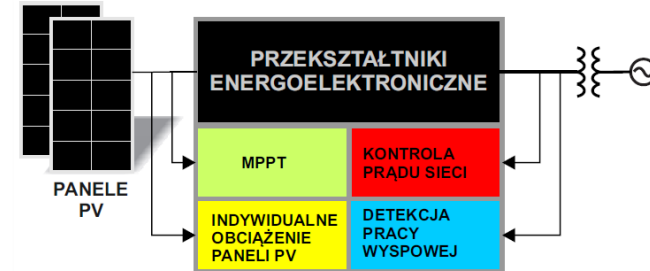
TECHNIKA CONSTANT VOLTAGE (OPEN CIRCUIT VOLTAGE)

- POMIAR NAPIĘCIA OTWARTEGO OBWODU - U_{OC}
- USTALENIE NAPIĘCIA W MPP NA 76% U_{OC} : $U_{MP} \approx 0.76U_{OC}$

- METODA WYMAGA POMIARU PRZY ZEROWYM PRĄDZIE PANELI PV – NIEWIELKA STRATA ENERGII
- 76% U_{OC} NIE JEST DOKŁADNĄ WARTOŚCIĄ U_{MPP}

- NIEZBĘDNA JEST CZASOWA KALIBRACJA - STARZENIA PANELI PV .

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.



Slajd 27/59

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

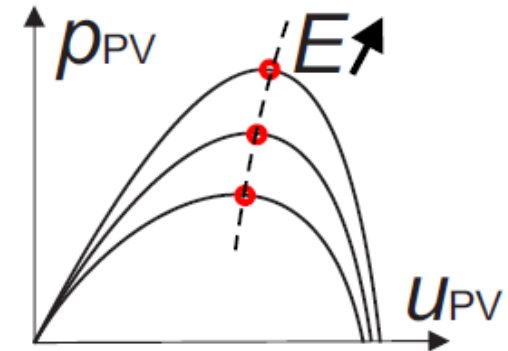
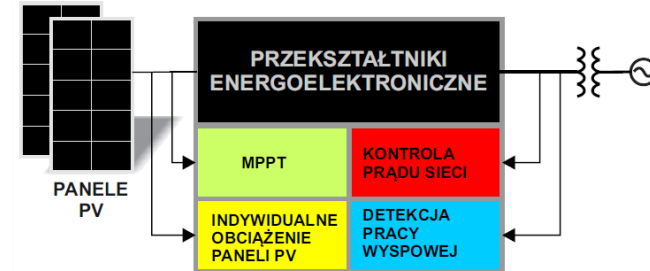
MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

TECHNIKA SHORT-CIRCUIT CURRENT

- METODA ZAKŁADA PROPORCJONALNOŚĆ PRĄDU W MPP I_{MPP} I PRĄDU ZWARCIA I_{SC} : $I_{MPP} \approx (0.78 - 0.92)I_{SC}$

- PROBLEM POMIARU PRĄDU ZWARCIA

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.



Slajd 28/59

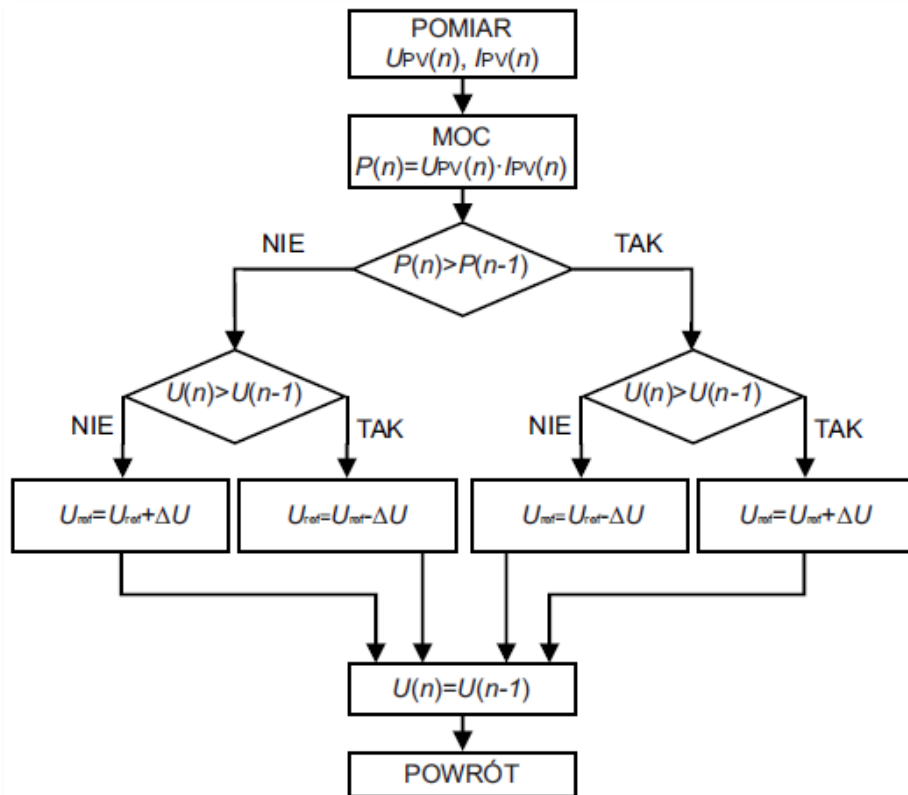
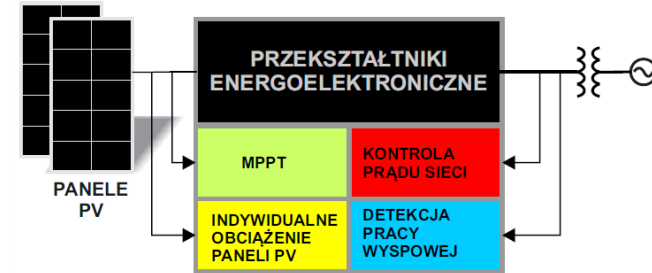
STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

TECHNIKA PERTURB AND OBSERVE (P&O)

PORÓWNANIE MOCY PRZED I PO ZMIANIE OBCIĄŻENIA (ZABURZENIE) PRZEZ SYSTEM DOŁĄCZONY DO PANELI PV

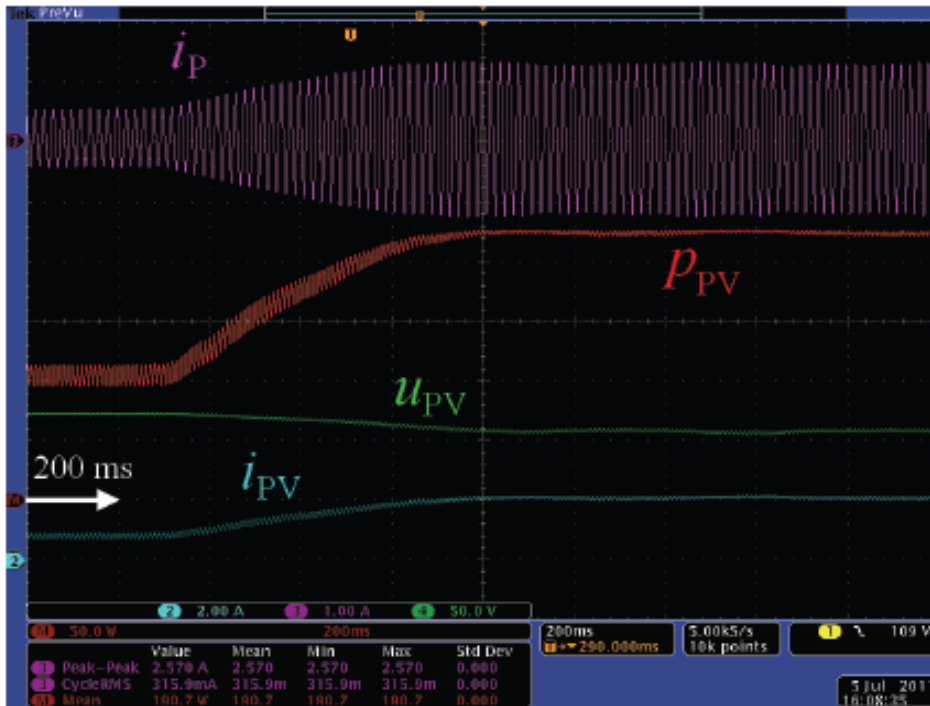


STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO – KONTROLA PRĄDU SIECI

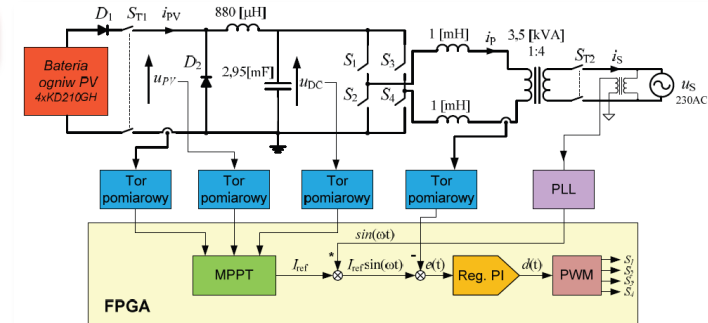
Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

WYNIKI EKSPERYMENTALNE

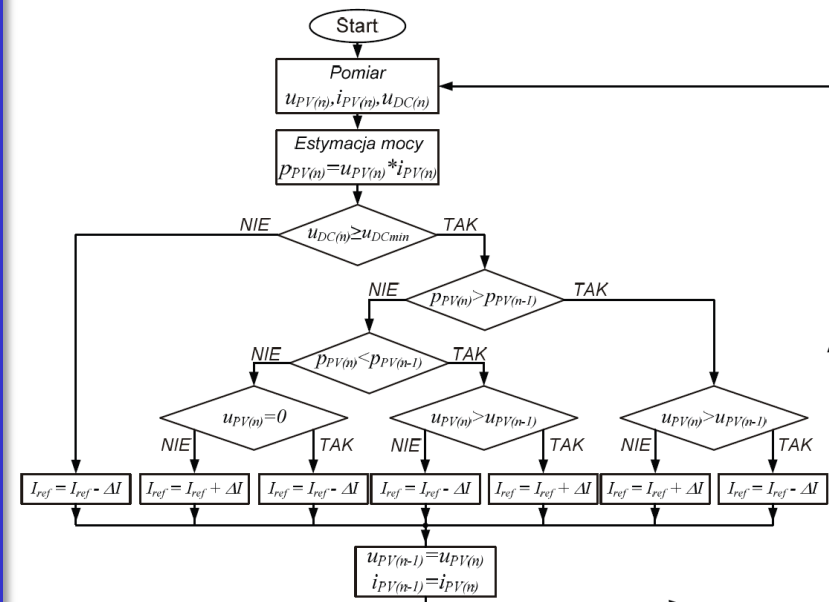
Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



Rys. 9. Poszukiwanie punktu mocy maksymalnej (MPPT): prąd baterii ogniw PV - i_{pV} (CH2, 2A/dz), prąd strony pierwotnej transformatora - i_p (CH3, 1A/dz), napięcie baterii ogniw PV - u_{pV} (CH4), moc baterii ogniw PV - p_{pV} (M, 50W/dz – oscyloskopowy iloczyn przebiegów i_{pV} oraz u_{pV})



Rys. 1. Schemat układu



STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

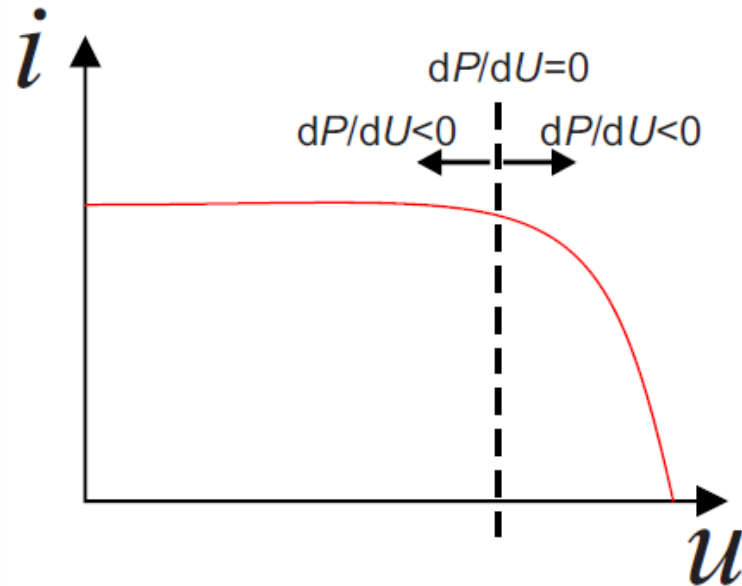
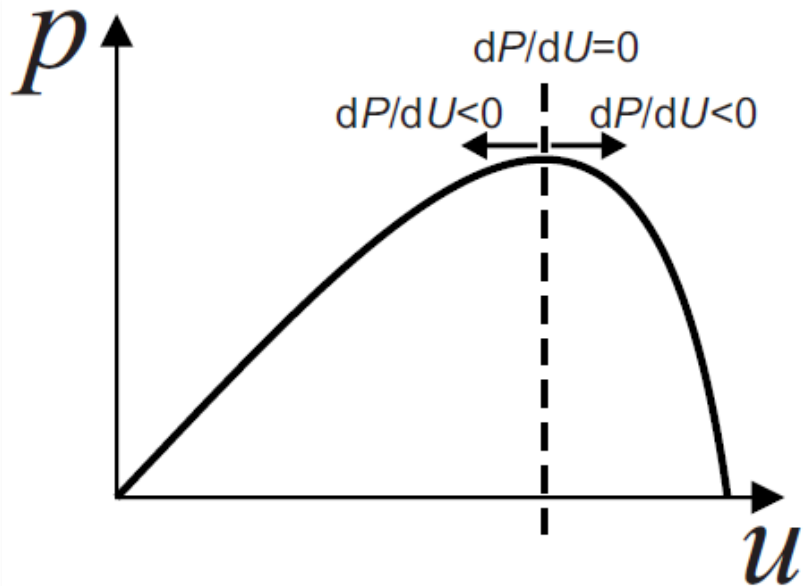
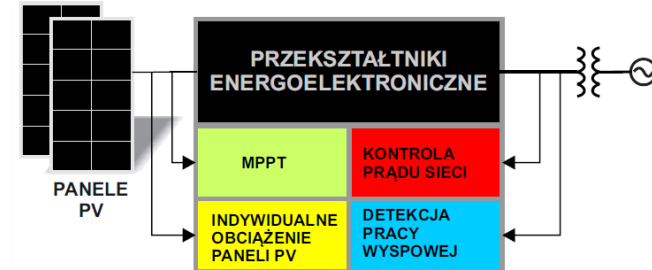
TECHNIKA INCREMENTAL CONDUCTANCE (IncCond)

ANALIZA dP/dU :

$$dP/dU = d(UI)/dU;$$

$$dP/dU = I \cdot (dU/dU) + U \cdot (dI/dU);$$

$$\Delta P/\Delta U = I + U \cdot (\Delta I/\Delta U);$$



Slajd 31/59

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

TECHNIKA INCREMENTAL CONDUCTANCE (IncCond)

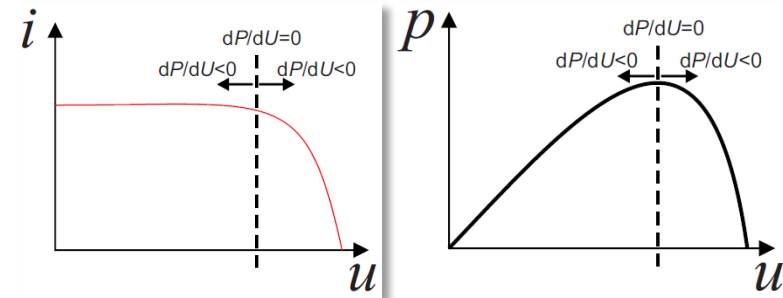
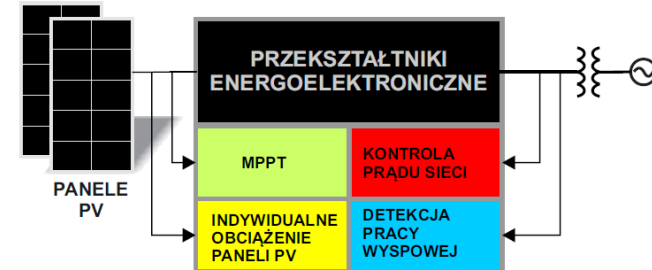
ANALIZA dP/dU :

$$\Delta P/\Delta U = I + U \cdot (\Delta I/\Delta U);$$

W MPP: $\Delta P/\Delta U = 0 \Rightarrow \Delta I/\Delta U = -I/U$;

Dla: $\Delta P/\Delta U > 0$: $\Delta I/\Delta U > -I/U$;

Dla: $\Delta P/\Delta U < 0$: $\Delta I/\Delta U < -I/U$;



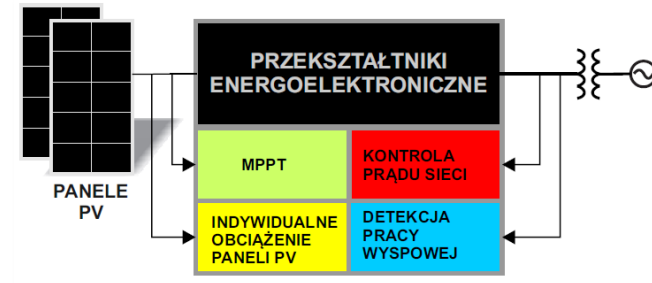
METODA NIE WYMAGA WYLICZANIA MOCY!

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

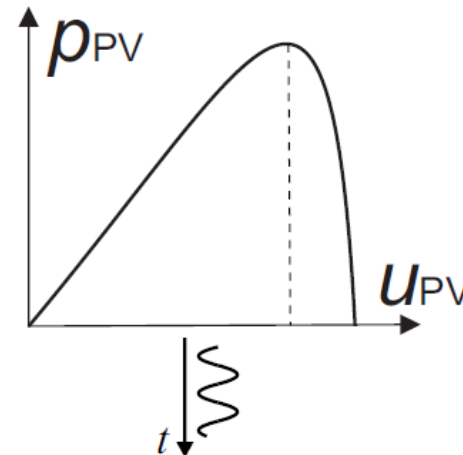
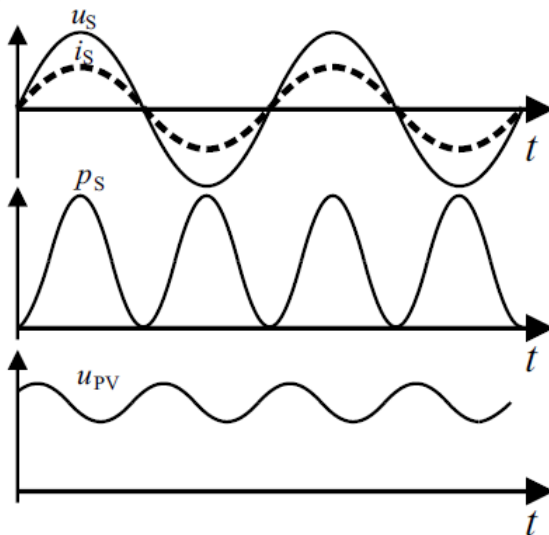
MPPT I SKŁADOWA ZMIENNA MOCY PANELI PV



- W JEDNOFAZOWYCH SYSTEMACH MOC WYJŚCIOWA NIE JEST STAŁA:

$$P = U_m \sin(\omega t) I_m \sin(\omega t),$$

- W MOCY WYJŚCIOWEJ FALOWNIKA WYSTĘPUJE SKŁADOWA 100Hz,
- W NAPIĘCIU PV WYSTĘPUJĄ TĘTNIENIA, KTÓRE MOŻNA WYKORZYSTAĆ DO MPPT



Slajd 33/59

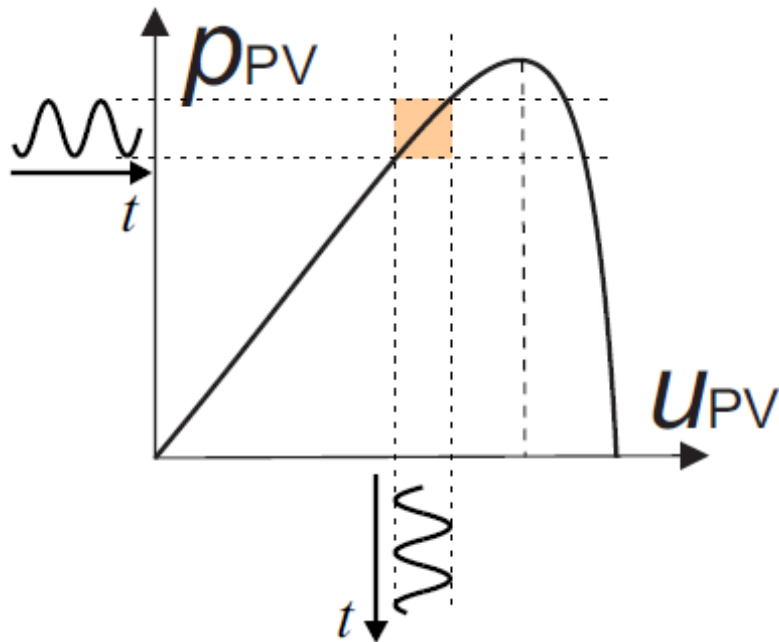
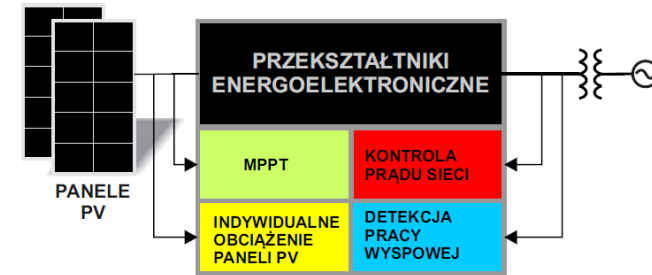
STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

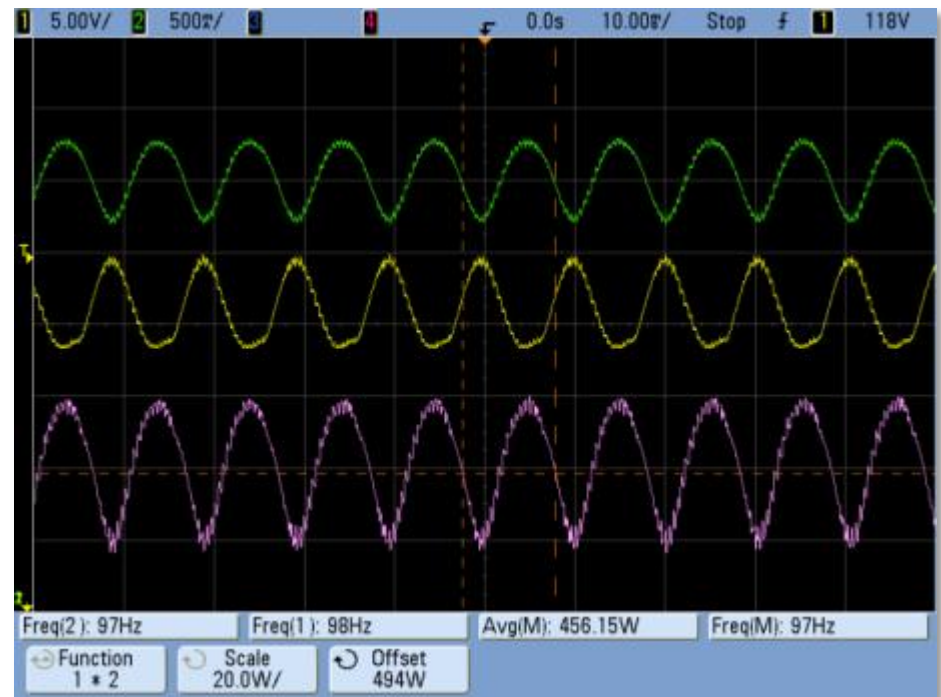
MPPT NA PODSTAWIE SKŁADOWYCH $n \cdot 50\text{Hz}$

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



$$U_{PV} < U_{MPP}$$

100Hz we wszystkich sygnałach



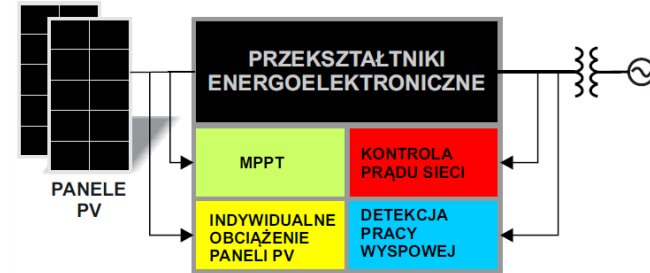
Slajd 34/59

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

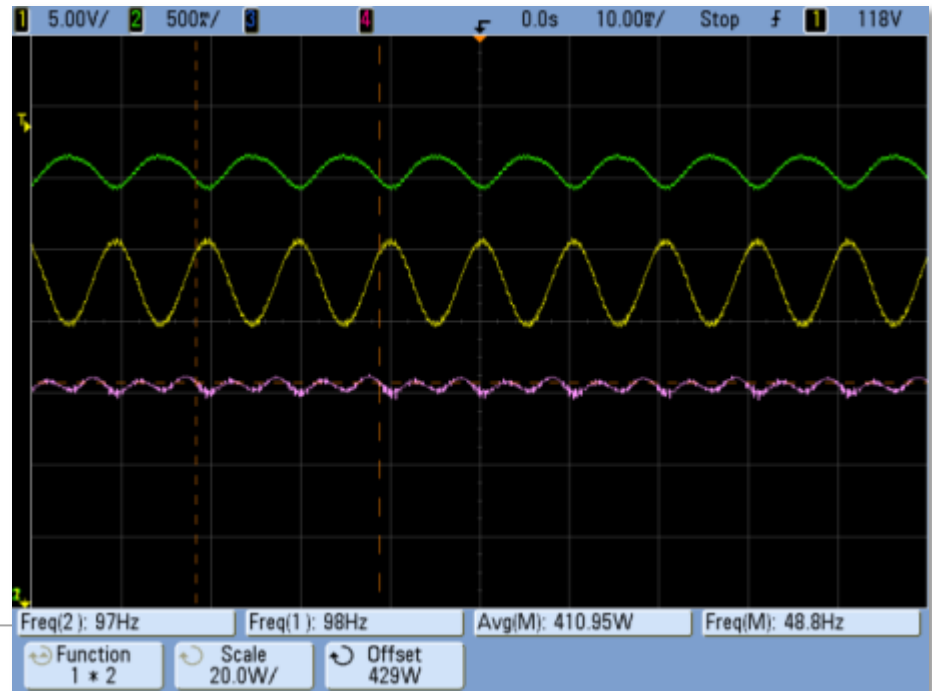
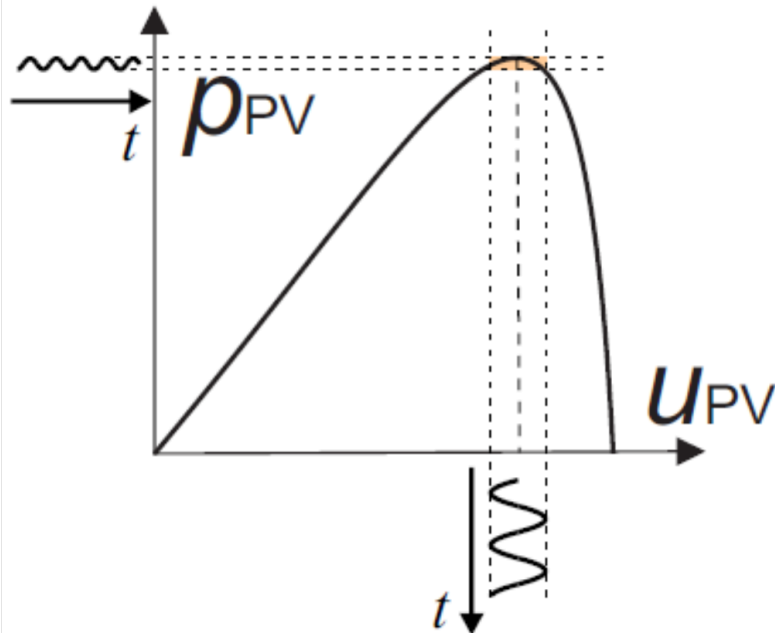
Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

MPPT NA PODSTAWIE SKŁADOWYCH $n \cdot 50\text{Hz}$



Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



u_{PV} otacza u_{MPP}

100Hz w sygnale u_{PV} , 200Hz w sygnale p_{PV} .

Źródło (pomiar oscyloskopowy): R. Stala, K. Koska, L. Stawiarski: "Realization of Modified Ripple-Based MPPT in a Single-Phase Single-Stage Grid-Connected Photovoltaic System", *International Symposium on Industrial Electronics IEEE ISIE 2011*, 27-30 June 2011, Gdansk, Poland, pp. 1106 - 1111.

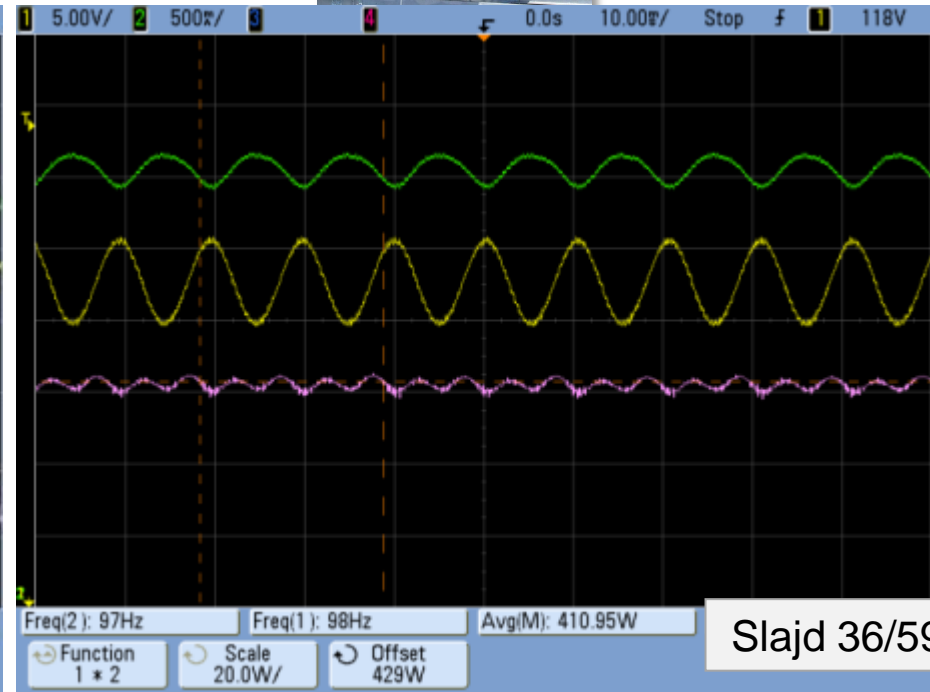
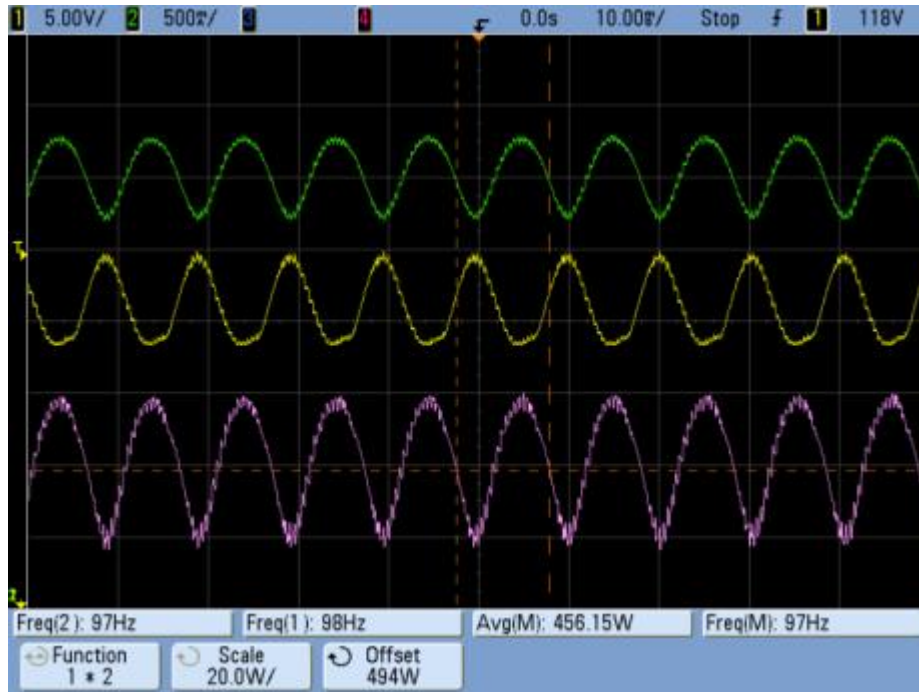
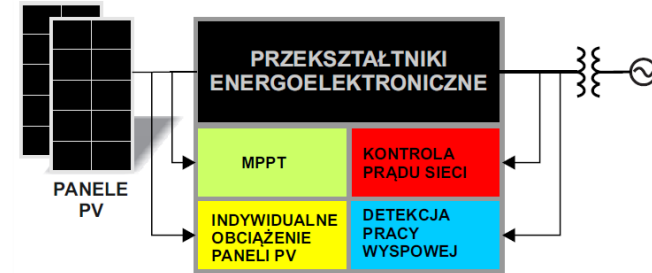
STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

MPPT NA PODSTAWIE SKŁADOWYCH $n \cdot 50\text{Hz}$

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.



Slajd 36/59

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

MPPT - Maximum Power Point Tracking – techniki śledzenia punktu maksymalnej mocy źródła PV

MPPT NA PODSTAWIE SKŁADOWYCH $n \cdot 50\text{Hz}$

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N510389535, „Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA”, w latach 2008-2011.

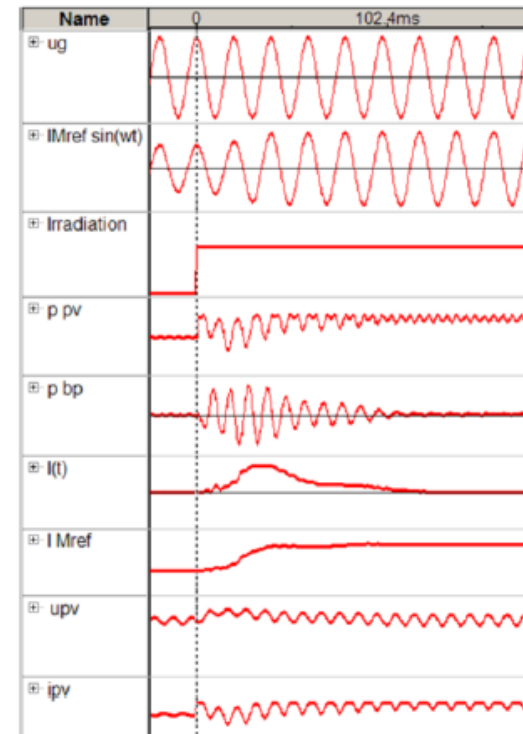
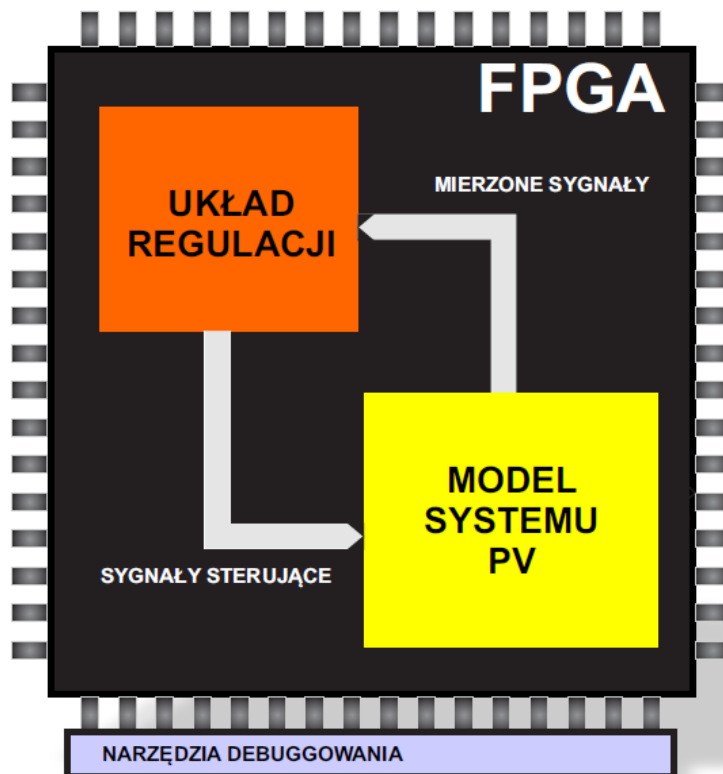
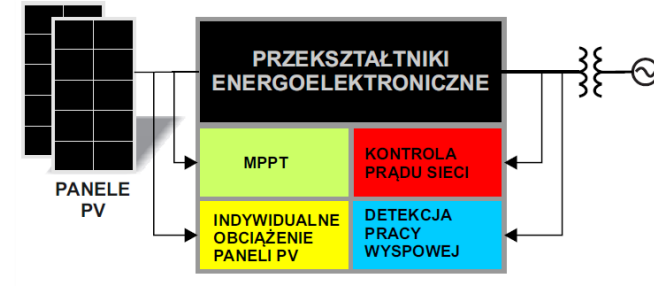


Fig. 16. Response of designed MPPT algorithm to the step change of irradiation. u_g - grid voltage, $I_{Mref} \sin(\omega t)$ - reference of the grid current, p_{pv} - power of the PV array, p_{bp} - filtered signal, $I(t)$ - result of integral, I_{Mref} - output of the MPPT PI-type controller, u_{pv} , i_{pv} - voltage and current of the PV array. JTAG data acquisition..

Slajd 37/59

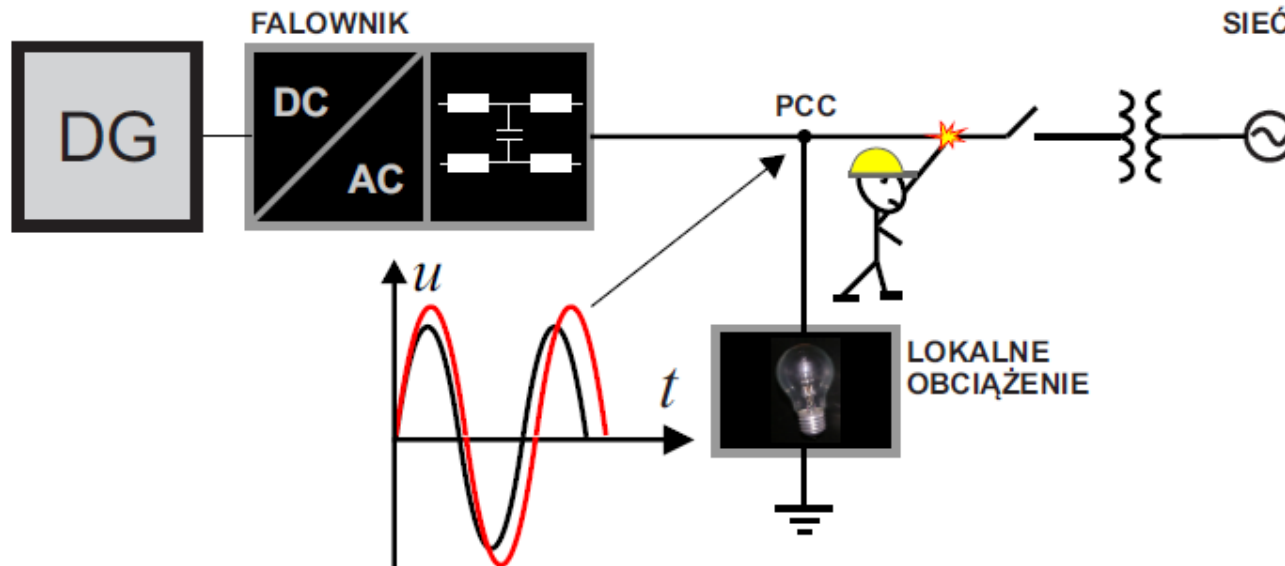
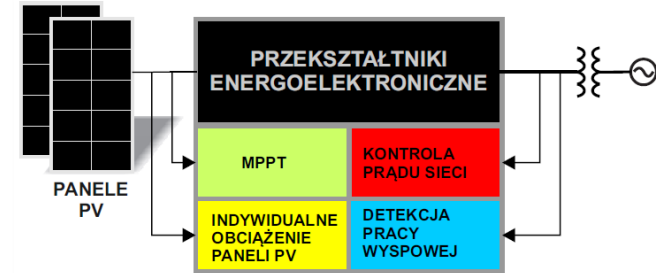
WYKRYWANIE PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA – Anti Islanding control

- PROBLEM PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA I ZABEZPIECZENIA FALOWNIKA ŁĄCZĄCEGO GENERATOR ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ
- METODY PASYWNE DETEKCJI PRACY WYSPOWEJ GENERATORA DOŁĄCZONEGO DO SIECI
- METODY AKTYWNE DETEKCJI PRACY WYSPOWEJ SYSTEMU PV DOŁĄCZONEGO DO SIECI



WYKRYWANIE PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA – Anti Islanding control

ZAGROŻENIA PRZY PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

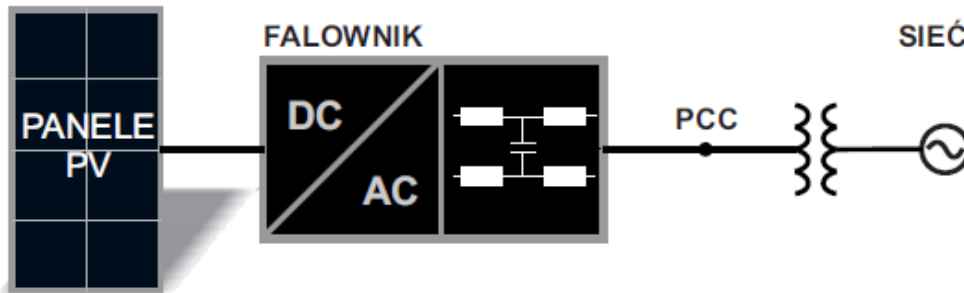


- WYSTĘPOWANIE NAPIĘCIA NA ODŁĄCZONEJ LINII JEST NIEBEZPIECZNE DLA LUDZI,
- ZMIANA WARTOŚCI NAPIĘCIA, LUB CZĘSTOTLIWOŚCI W LINII PRACUJĄCEJ WYSPOWO JEST NIEBEZPIECZNE DLA ZASILANYCH URZĄDZEŃ

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

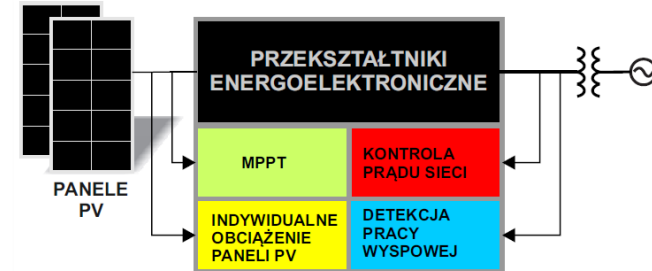
WYKRYWANIE PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA – Anti Islanding control

ZAKRES NAPIĘCIA I CZĘSTOTLIWOŚCI FALOWNIKA DOŁĄCZONEGO DO SIECI



NORMY, NP. EN 50438, PN EN 61727, SPECYFIKUJĄ ZAKRESY ZMIAN NAPIĘCIA I CZĘSTOTLIWOŚCI W PCC, Z DANĄ TOLERANCJĄ POMIARU

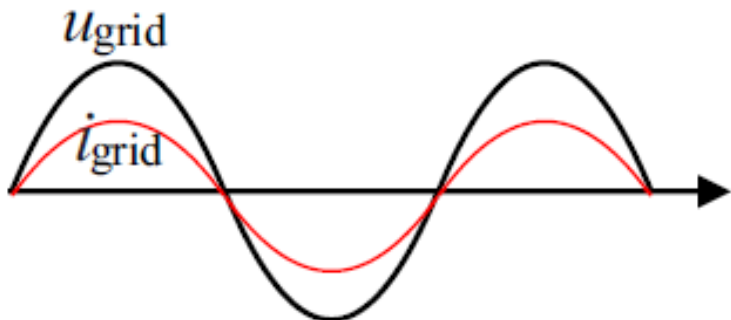
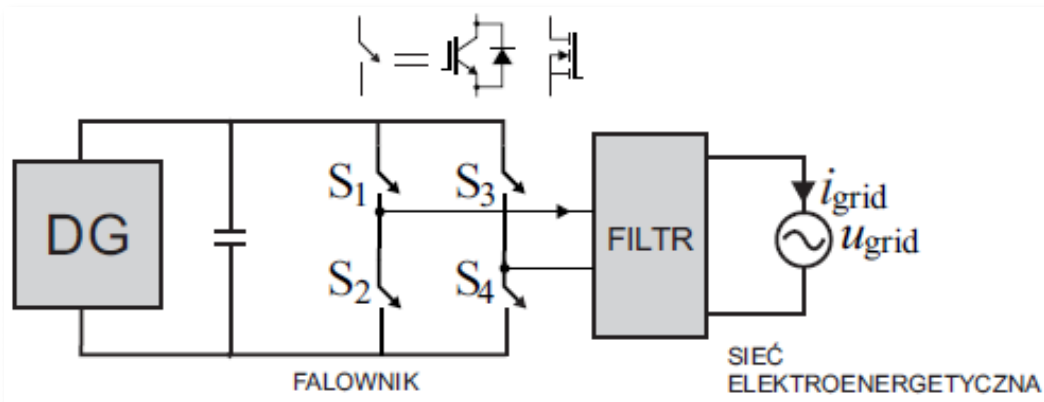
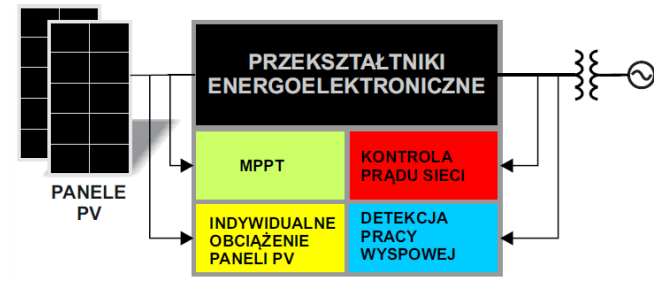
Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.



WYKRYWANIE PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

FALOWNIK DOŁĄCZONY DO SIECI

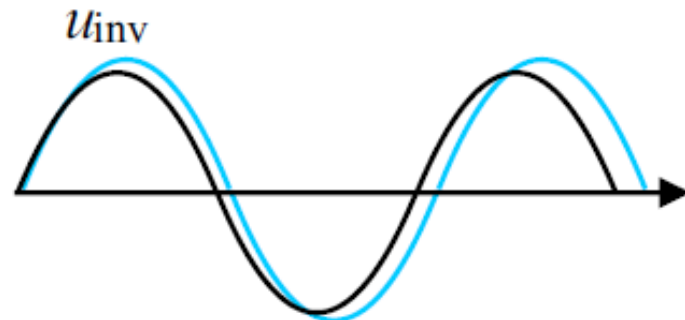
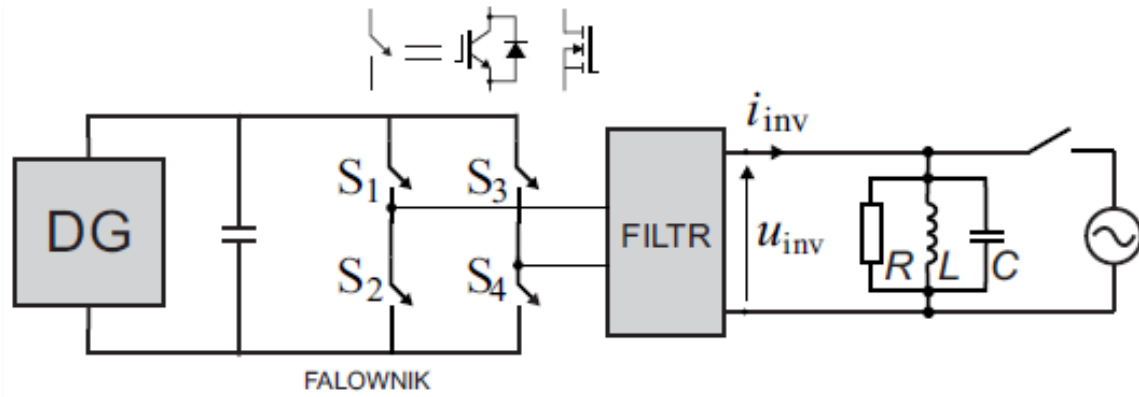
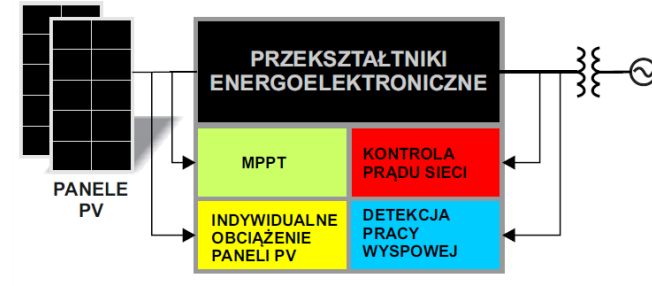
- WYMUSZONE NAPIĘCIE SIECI
- PRĄD SIECI KSZTAŁTUJE FALOWNIK (WSPÓŁCZYNNIK MOCY $PF=P/S \approx 1$)



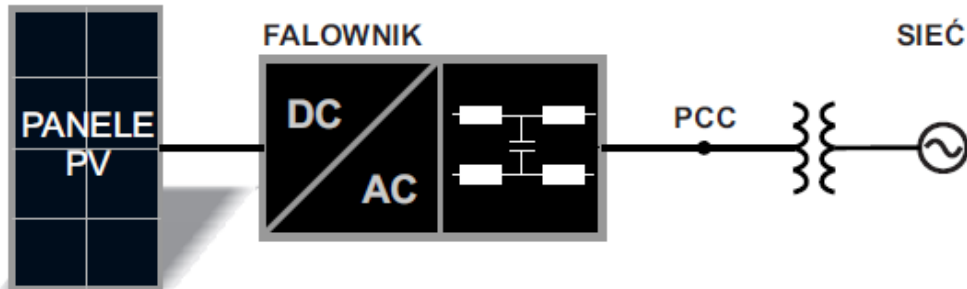
WYKRYWANIE PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

FALOWNIK PRACUJĄCY WYSPOWO

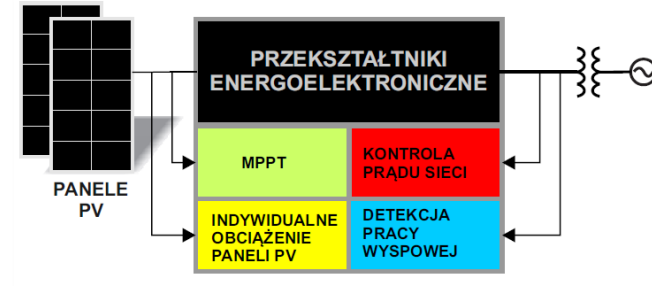
- PRZEBIEGI PRĄDU I NAPIĘCIA FALOWNIKA MOGĄ BYĆ ANALOGICZNE JAK PRZY DOŁĄCZONEJ SIECI
- ZMIANA W PRZEBIEGACH PO ODŁĄCZENIU OD SIECI POWODUJE ZADZIAŁANIE ZABEZPIECZEŃ FALOWNIKA



WYKRYWANIE PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA - METODY



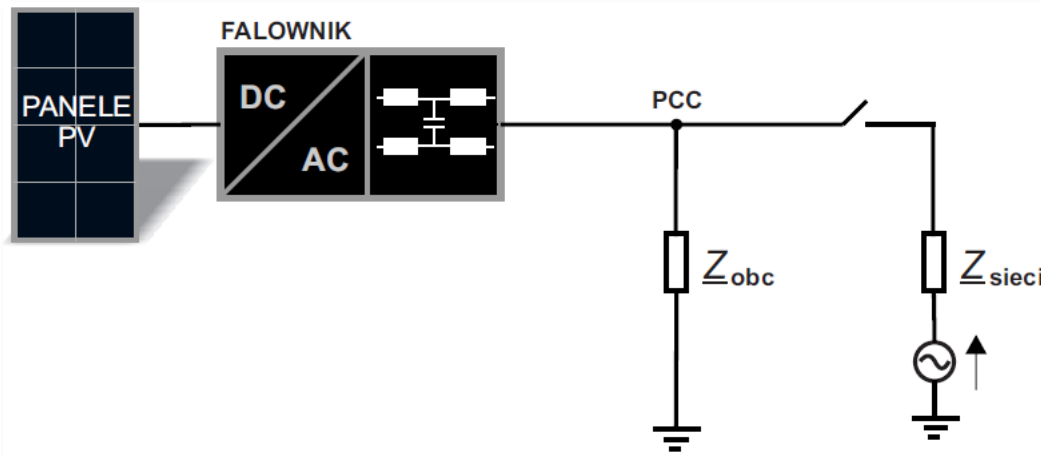
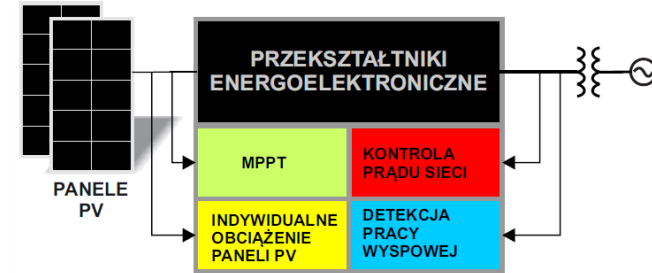
Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.



- METODY PASYWNE – BAZUJĄ NA POMIARZE NAPIĘCIA I CZĘSTOTLIWOŚCI W PCC
- METODY AKTYWNE REALIZOWANE PRZEZ FALOWNIK - BAZUJĄ NA REALIZACJI ZABURZENIA I POMIARZE CZĘSTOTLIWOŚCI, NAPIĘCIA I IMPEDANCJI SIECI
- METODY WYKORZYSTUJĄCE KOMUNIKACJĘ Z FALOWNIKIEM W CELU JEGO WYŁĄCZENIA

METODY PASYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

WYKORZYSTANIE RÓŻNICY IMPEDANCJI SIECI I LOKALNYCH OBCIĄŻEŃ



FALOWNIK GENERUJE PRĄD WYJŚCIOWY:

$$i_{inv} = I_{inv} \sin(\omega t + \phi)$$

PRZY DOŁĄCZONEJ SIECI:

- NAPIĘCIE PCC JEST RÓWNE NAPIĘCIU SIECI NIEZALEŻNIE OD PRĄDU

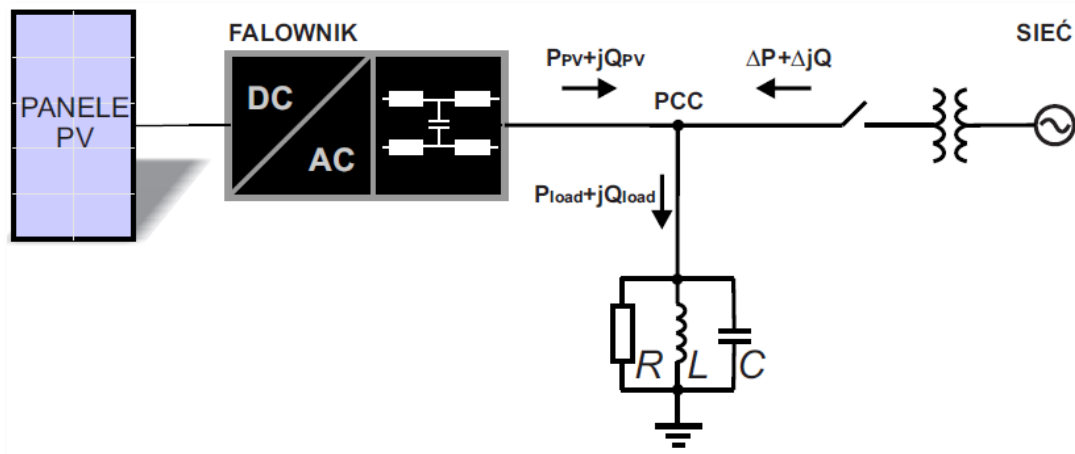
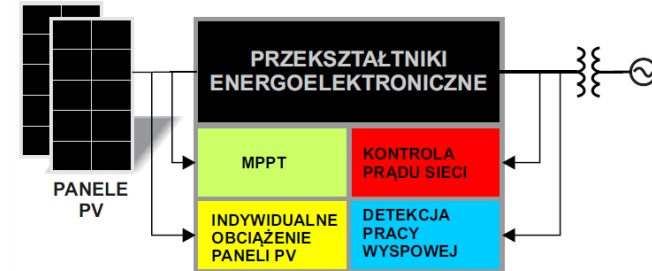
PO ODŁĄCZENIU SIECI:

- PRĄD FALOWNIKA PŁYNIJE DO OBCIĄŻEŃ, A NAPIĘCIE W PCC:

$$U_{PCC} = I_{inv} Z_{obc}$$

METODY PASYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

METODA POMIARU ODCHYLENIA NAPIĘCIA OVP/UV – OVERVOLTAGE/UNDERVOLTAGE PROTECTION

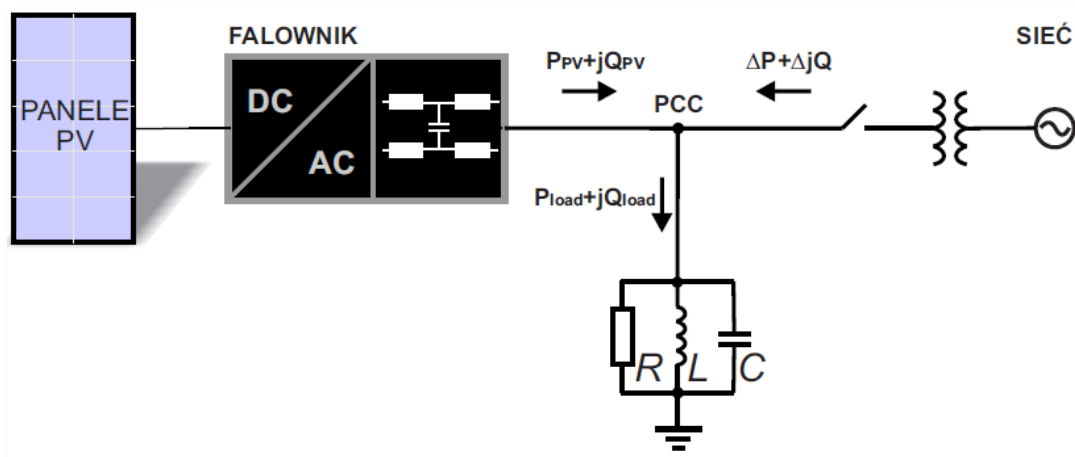
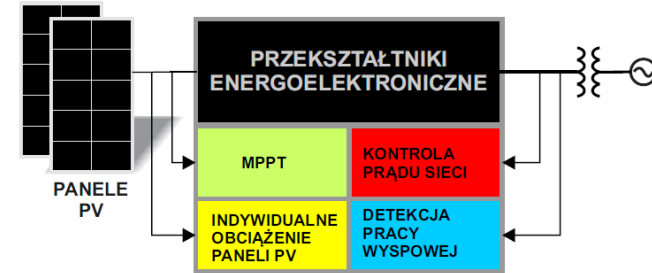


- W PRZYPADKU GDY WARTOŚĆ NAPIĘCIA W PCC JEST POZA ZNAMIONOWYM LIMITEM, FALOWNIK PRZESTAJE ZASILAĆ SIEĆ.

- JEST TO ZABEZPIECZENIE, KTÓRE PEŁNI RÓWNOCZEŚNIE FUNKCJĘ DETEKCJI PRACY WYSPOWEJ.

METODY PASYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

METODA POMIARU ODCHYLENIA NAPIĘCIA OVP/UVP – OVERVOLTAGE/UNDERVOLTAGE PROTECTION



- W PRZYPADKU GDY WARTOŚĆ NAPIĘCIA W PCC JEST POZA ZNAMIONOWYM LIMITEM, FALOWNIK PRZESTAJE ZASILĄĆ SIEĆ.

- JEST TO ZABEZPIECZENIE, KTÓRE PEŁNI RÓWNOCZEŚNIE FUNKCJĘ DETEKCJI PRACY WYSPOWEJ.

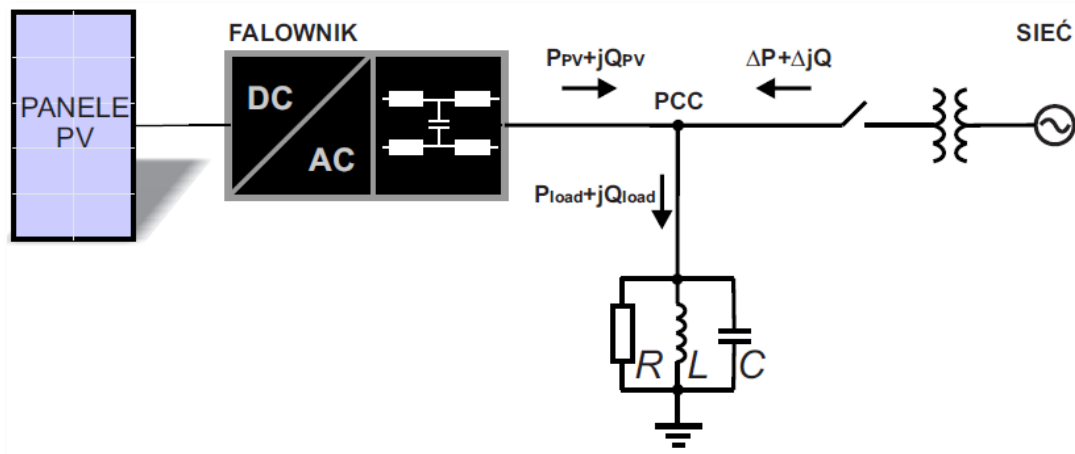
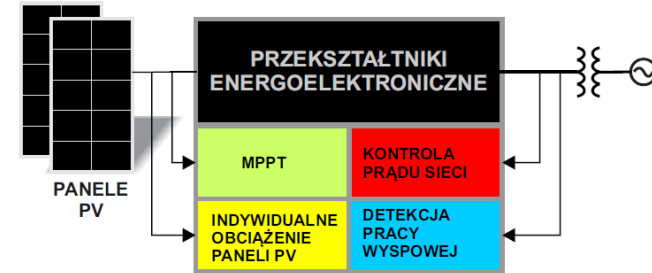
$$\Delta P = P_{\text{load}} - P_{\text{PV}}$$

Jeżeli przed odłączeniem sieci $\Delta P \neq 0$ to po odłączeniu napięcie w PCC zmieni wartość:

$$P_{\text{load}} = U^2/R \Rightarrow U$$

METODY PASYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

METODA POMIARU ODCHYLENIA NAPIĘCIA OVP/UVP – OVERVOLTAGE/UNDERVOLTAGE PROTECTION



- W PRZYPADKU GDY WARTOŚĆ NAPIĘCIA W PCC JEST POZA ZNAMIONOWYM LIMITEM, FALOWNIK PRZESTAJE ZASILAĆ SIEĆ.

- JEST TO ZABEZPIECZENIE, KTÓRE PEŁNI RÓWNOCZEŚNIE FUNKCJĘ DETEKCJI PRACY WYSPOWEJ.

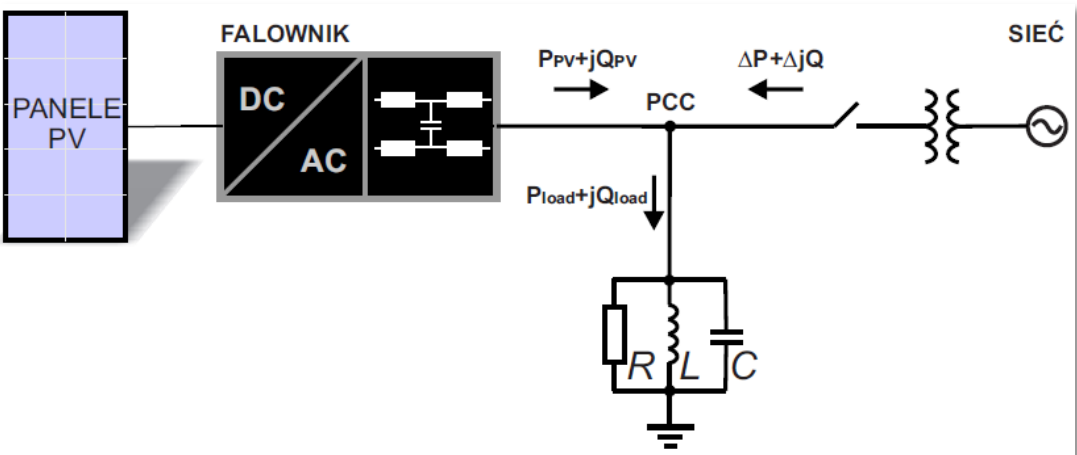
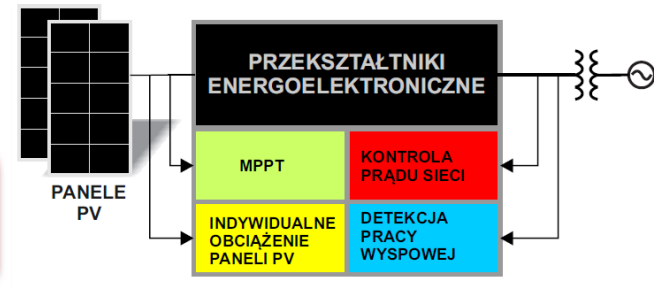
$$\Delta P = P_{\text{load}} - P_{\text{PV}}$$

NDZ – non detection zone:

Jeżeli przed odłączeniem sieci $\Delta P = 0$ to po odłączeniu napięcie w PCC nie zmienia wartości

METODY PASYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

METODA POMIARU ODCHYLENIA CZĘSTOTLIWOŚCI OFP/UFP – OVERFREQUENCY/UNDERFREQUENCY PROTECTION



- W PRZYPADKU GDY WARTOŚĆ **CZĘSTOTLIWOŚCI** W PCC JEST POZA ZNAMIONOWYM LIMITEM, FALOWNIK PRZESTAJE ZASILĄĆ SIEĆ.

$$\Delta Q = Q_{load} - Q_{PV}$$

Przed odłączeniem sieci $Q_{PV} = 0$ – falownik pracuje z $PF = 1$

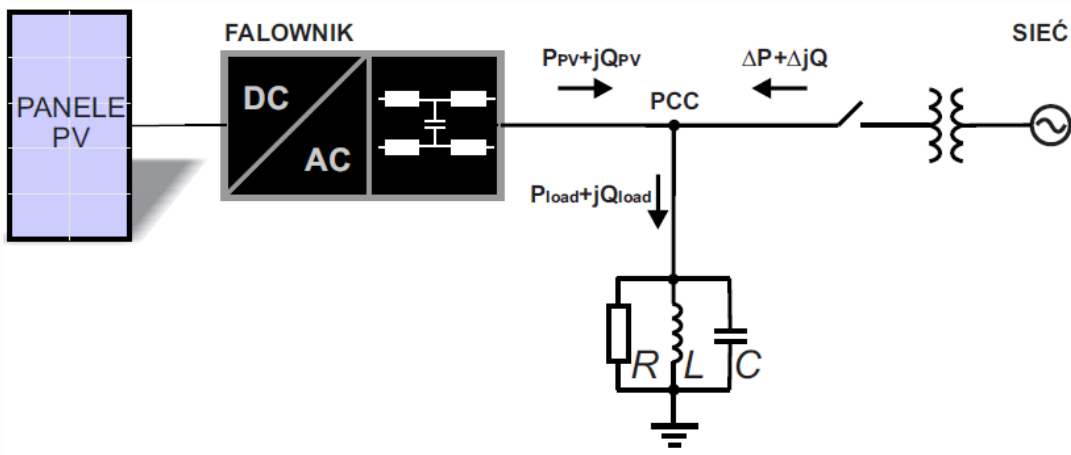
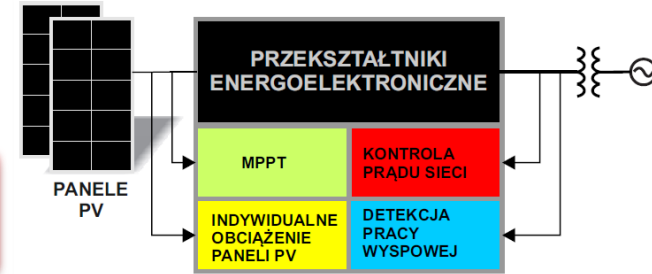
Po odłączeniu sieci następuje zmiana fazy napięcia w PCC:

$$\underline{U} = \underline{I}_{inv} / (G + jB) = \underline{I}_{inv} / (G + j\omega C - j1/\omega L).$$

Przypadek $Q_{PV} = 0$ wystąpi dla częstotliwości, przy której $\underline{Y}_{LC} = 0s$.

METODY PASYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

METODY POMIARU ODCHYLENIA NAPIĘCIA I CZĘSTOTLIWOŚCI



ZALETY:

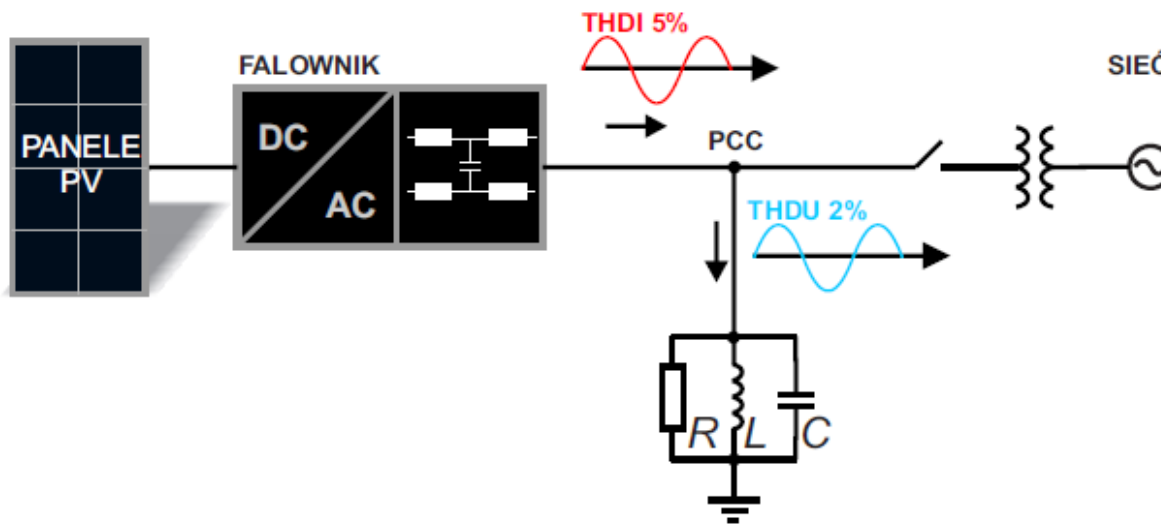
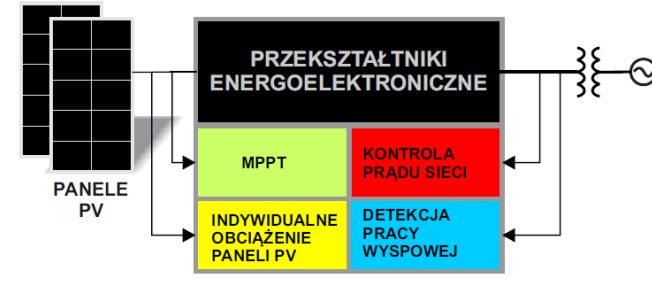
- NISKI KOSZT,
- PEŁNIĄ RÓWNOCZEŚNIE FUNKCJE ZABEZPIECZENIA

WADY:

- MOŻLIWE PRZYPADKI NIESKUTECZNOŚCI

METODY PASYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

DETEKCJA HARMONICZNYCH NAPIĘCIA



W OBECNOŚCI „SZTYWNEGO” NAPIĘCIA SIECI THDU \approx 2%.

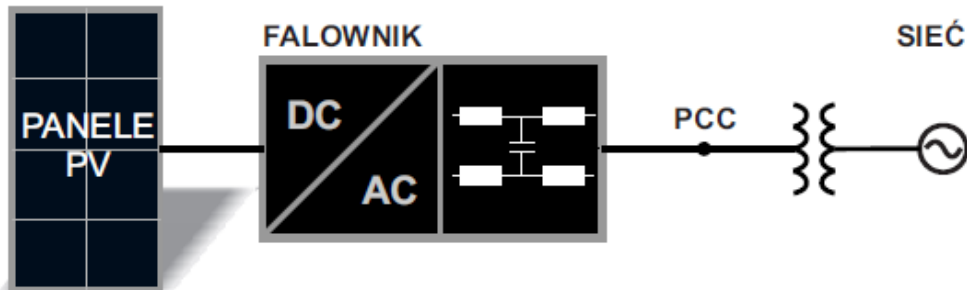
PO ODŁĄCZENIU SIECI MOŻE WZROSNAĆ.

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

METODY AKTYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

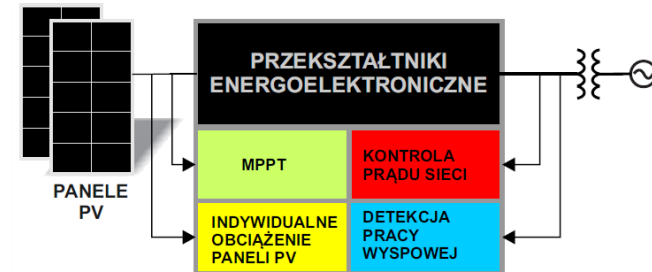
Active Frequency Drift (AFD)

Slip-Mode frequency Shift (SMS)



- NIEWIELKIE ODCHYLENIE FAZY PRĄDU FALOWNIKA I DETEKCJA SKUTKÓW.
- NIEWIELKI NDZ.

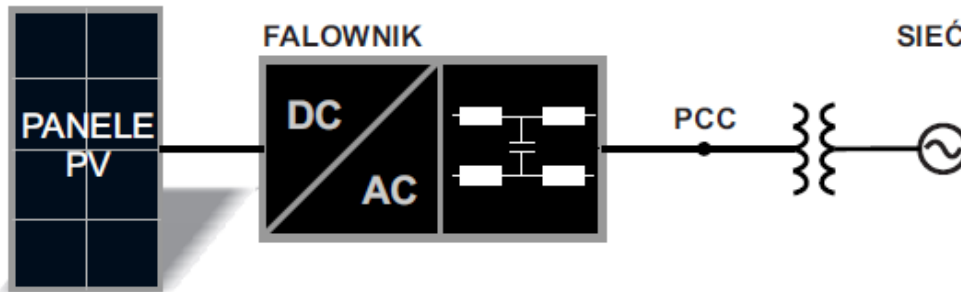
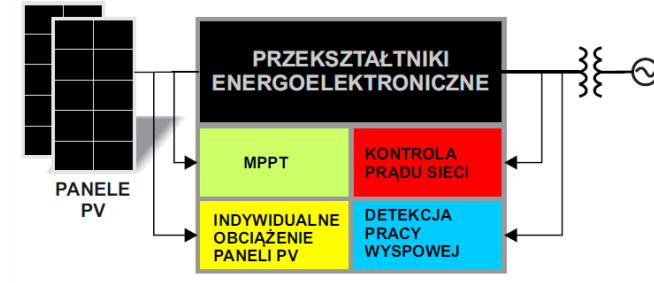
Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.



Slajd 51/59

METODY AKTYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

DETEKCJA WYMUSZONEJ ZMIANY NAPIĘCIA



FALOWNIK GENERUJE PRĄD WYJŚCIOWY:

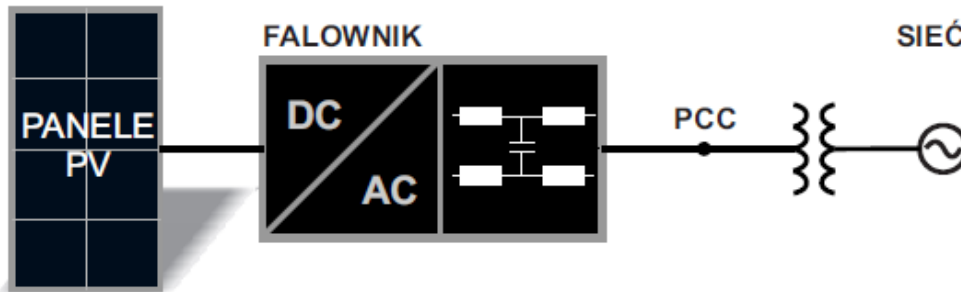
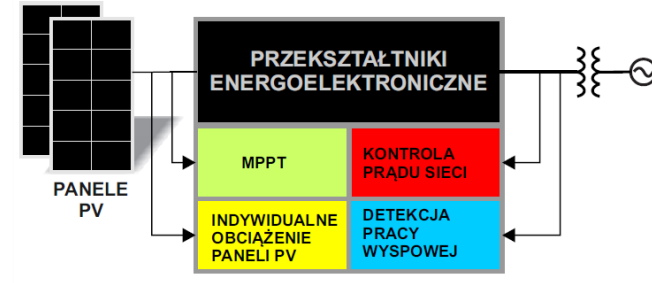
$$i_{inv} = I_{inv} \sin(\omega t + \phi)$$

PRZEZ STEROWANIE MOŻNA ZMIENIĆ PARAMETR PRĄDU FALOWNIKA, NP. AMPLITUDE

POMIAR NAPIĘCIA W PCC MOŻE UAKTYWNIĆ ZABEZPIECZENIA (NP. OVP/UVP)

METODY AKTYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

DETEKCJA IMPEDANCJI DLA HARMONICZNYCH



FALOWNIK GENERUJE PRĄD WYJŚCIOWY:

$$i_{inv} = I_{inv} \sin(\omega t + \phi) + \sum i_{inv(n)}$$

PO ZMIANIE WIDMA PRĄDU:

PRZY DOŁĄCZONEJ SIECI O NISKIEJ IMPEDANCJI HARMONICZNE PRĄDU NIE ZMIENIĄ NAPIĘCIA

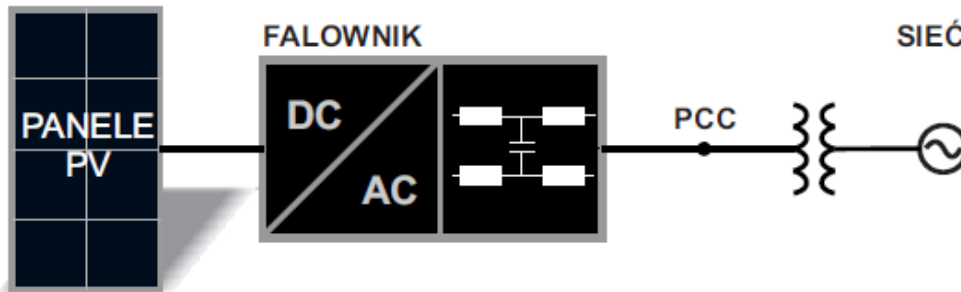
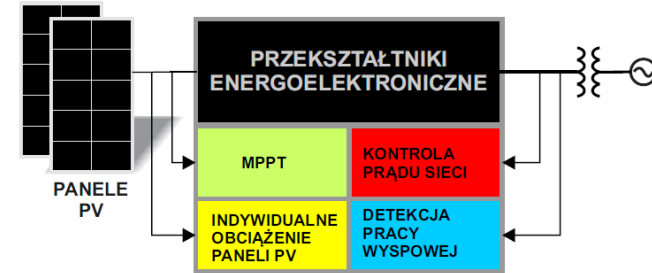
PRZY ODŁĄCZONEJ SIECI HARMONICZNE PRĄDU BĘDĄ POJAWIAĆ SIĘ W NAPIĘCIU NA LINIOWYM OBCIĄŻENIU I MOGĄ ZOSTAĆ WYKRYTE

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.

METODY AKTYWNE WYKRYWANIA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

SPRZĘŻENIE OD ZMIAN CZĘSTOTLIWOŚCI I NAPIĘCIA



SPRZĘŻENIE, KTÓRE DESTABILIZUJE PRACĘ FALOWNIKA W WARUNKACH PRACY WYSPOWEJ

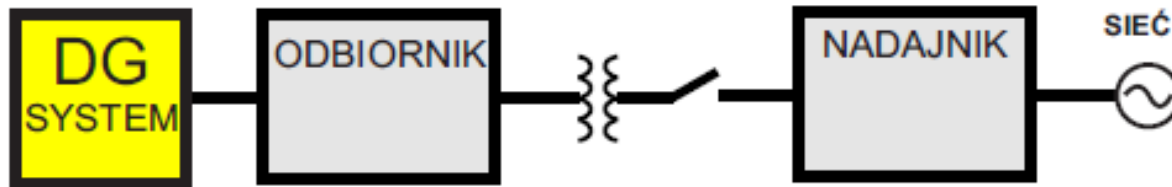
DODATNIE SPRZĘŻENIE MOŻE BYĆ REALIZOWANE OD AMPLITUDY, CZĘSTOTLIWOŚCI LUB FAZY

Slajd 54/59

STEROWANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO

ZDALNE TECHNIKI ZABEZPIECZENIA DLA PRACY WYSPOWEJ FALOWNIKA

PLCC, SCADA



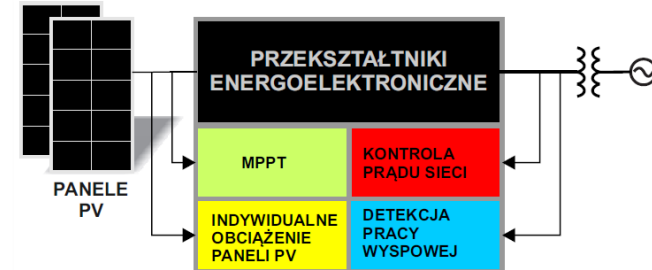
PLCC: Power line carrier communications – ciągle nadawany sygnał od strony sieci odbierany po stronie DG (distributed generator).

ODŁĄCZENIE SIECI PRZERYWA ODBIÓR SYGNAŁU.

PLCC MOŻE BYĆ UŻYTY DO DETEKCJI PRACY WYSPOWEJ POZA DEDYKOWANYM ZASTOSOWANIEM

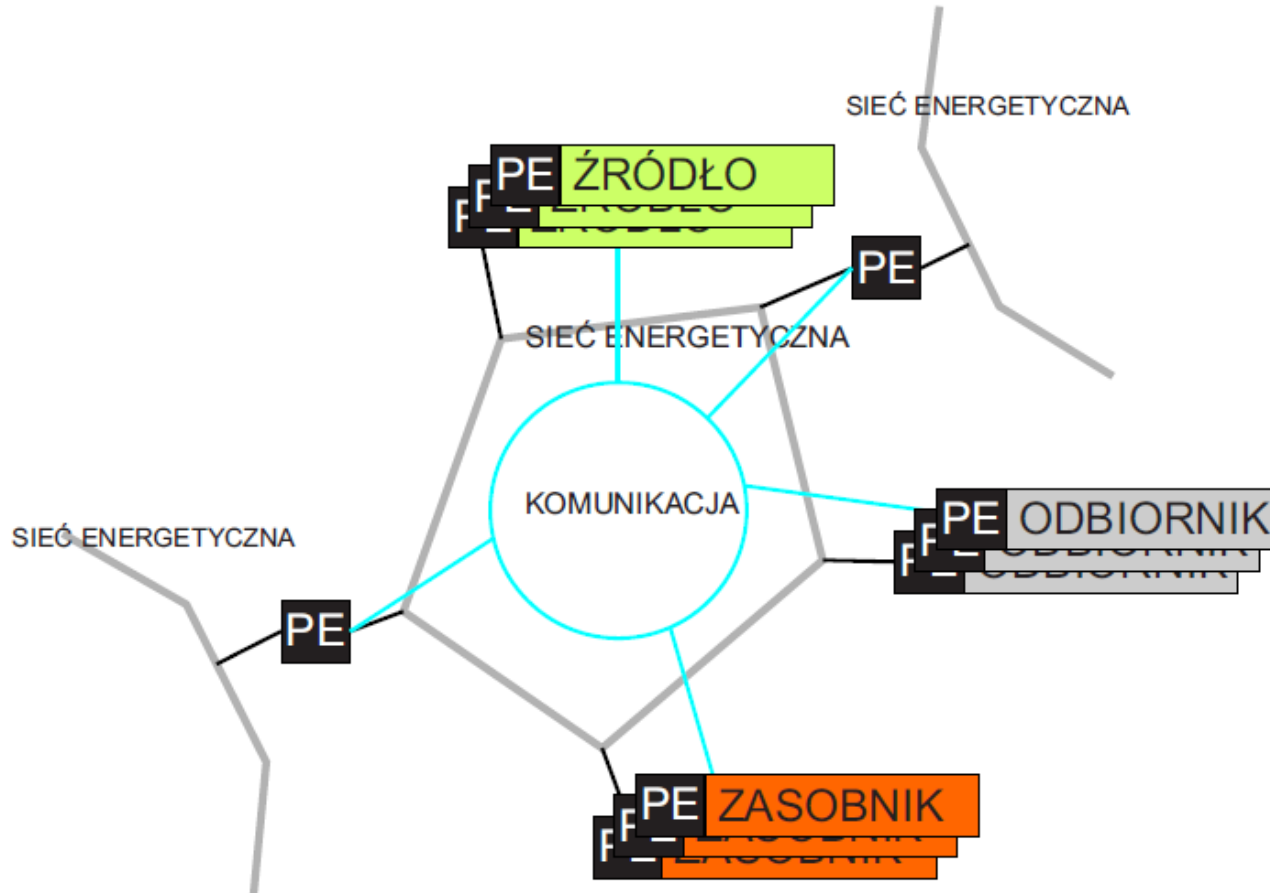
SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition or SCADA systems, - monitorowanie stanu wyłączników.

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.



SYSTEM ENERGETYCZNY PRZYSZŁOŚCI BAZUJĄCY NA TECHNOLOGII SMART-GRID

Robert Stala, „Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej”, AGH Kraków 2012.



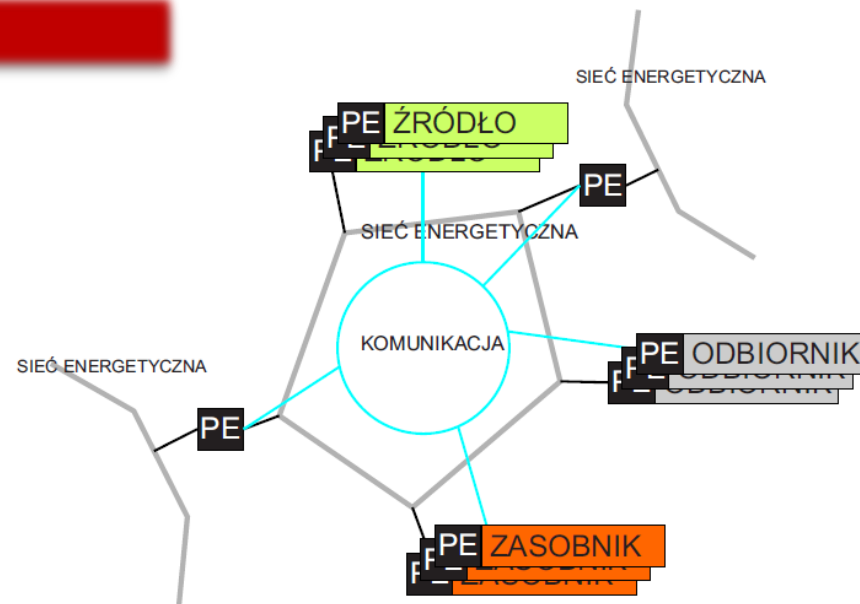
Komunikacja umożliwia:

- kontrolę sieci,
- koordynację produkcji, odbioru i magazynowania energii

PE - Przekształtnik Energoelektroniczny

Fotowoltaika w SMART GRID

- ENERGIA GENEROWANA JEST NA MIEJSCU,
- PRZESYŁ ENERGII MOŻE BYĆ REALIZOWANY NA NIEWIELKIE ODLEGŁOŚCI,
- KONIECZNOŚĆ MAGAZYNOWANIA ENERGII DLA POTRZEB W GODZINACH NOCNYCH
- KOMUNIKACJA UMOŻLIWIA KONTROLĘ SIECI, ORAZ KOORDYNACJĘ PRODUKCJI, ODBIORU I MAGAZYNOWANIA ENERGII



PE - Przekształtnik Energoelektroniczny

- PROBLEMY STEROWANIA WE WSPÓŁCZESNYCH SYSTEMACH PV SĄ WCIĄŻ AKTUALNE W SIECIACH SMART GRID,
- KOMUNIKACJA ZNACZNIE USPRAWNIA WYKORZYSTANIE I ZABEZPIECZENIA AUTONOMICZNYCH ŹRÓDEŁ FOTOWOLTAICZNYCH.

- W PREZENTACJI PRZEDSTAWIONO WYMAGANIA DLA SYSTEMÓW PV ZAWARTE W ŚWIATOWYCH STANDARDACH
- PRZEDSTAWIONO PODSTAWOWE PROBLEMY STEROWANIA W SYSTEMACH FOTOWOLTAICZNYCH:
 - KONTROLĘ PRĄDU SIECI,
 - POSZUKIWANIE MPP,
 - DETEKCJĘ PRACY WYSPOWEJ
 - STEROWANIE SPECJALNE
- PRZEDSTAWIONO STAN BADAŃ ŚWIATOWYCH I WYNIKI BADAWCZE ZESPOŁU AUTORA,
- PRZEDSTAWIONO DANE ROZWOJU FOTOWOLTAIKI W EUROPIE,
- ZAADRESOWANO PROBLEM DALSZYCH BADAŃ NAD FOTOWOLTAIKĄ W KONTEKŚCIE TECHNOLOGII SMART GRID.

Źródła:

- [1] „Global market outlook for photovoltaics until 2014”, European Photovoltaic Industry Association Renewable Energy House, 2009.
- [2] „TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2008” Report IEA-PVPS T4-18, IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2009.
- [3] Energy Efficiency & Renewable Energy, „2009 Renewable Energy Data Book”, 2010 U.S. Department of Energy.
- [4] KC200GT - High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module. KYOCERA.
- [5] IEEE Guide for Terrestrial Photovoltaic Power System Safety”, IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Photovoltaics, 30 April 1998.
- [6] S. Piróg, R. Stala and Ł. Stawiarski: Power electronic converter for photovoltaic systems with use of FPGA-based real-time modeling of single phase grid-connected systems”, Bulletin of The Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 57, No. 4, 2009.
- [7] Ł. STAWIARSKI, M. SZAREK, A. MONDZIK, R. STALA, A. PENCZEK, „Jednofazowy system fotowoltaiczny dołączany do linii elektroenergetycznej”, Przegląd elektrotechniczny, R. 88 NR 2/2012, pp. 218-222.
- [8] R. Stala: “Individual MPPT of Photovoltaic Arrays with Use of Single-Phase Three-Level Diode-Clamped Inverter”, International Symposium on Industrial Electronics IEEE ISIE 2010, 4-7 July 2010, Bari, Italy, pp. 3456-3462.
- [9] S. R. Bründlinger, N. Henze, H. Häberlin, B. Burger, A. Bergmann, F. Baumgartner : prEN 50530 - The New European Standard for Performance Characterization of PV Inverters , 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
- [10] M. C. CAVALCANTI, K. C. OLIVEIRA, G. M. AZEVEDO, D. MOREIRA, F. A. NEVES, „Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems”, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY R. 82 NR 2/2006.
- [11] T. Esram, and P. L. Chapman, „Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques”, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 2, JUNE 2007.
- [12] R. Stala, K. Koska, L. Stawiarski: “Realization of Modified Ripple-Based MPPT in a Single-Phase Single-Stage Grid-Connected Photovoltaic System”, International Symposium on Industrial Electronics IEEE ISIE 2011, 27-30 June 2011, Gdansk, Poland, pp. 1106 - 1111.
- [13] J. Stevens, R. Bonn, J. Ginn, S. Gonzalez, and Greg Kern: „Development and Testing of an Approach to Anti-Islanding in Utility-Interconnected Photovoltaic Systems”, Photovoltaic System Applications Department Sandia National Laboratories, SAND 2000-1939, Aug. 2000.
- [14] EN 50438:2007 Requirements for the connection of micro-generators in parallel with public low-voltage distribution networks.
- [15] EN 61727 Systemy fotowoltaiczne (PV) -- Charakterystyki uniwersalnych złączy standardowych.
- [16] Bower and M. Ropp, „Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems”, SANDIA REPORT SAND2002-3591, Unlimited Release, Printed November 2002.
- [17] Yiding Jin, Qiang Song, Wenhua Liu, „Anti-islanding Protection for Distributed Generation Systems Based on Reactive Power Drift”, IEEE 2009.
- [18] J. Stevens, R. Bonn, J. Ginn, S. Gonzalez, and Greg Kern: „Development and Testing of an Approach to Anti-Islanding in Utility-Interconnected Photovoltaic Systems”, Photovoltaic System Applications Department Sandia National Laboratories, SAND 2000-1939, Aug. 2000.
- [19] HORS-SÉRIE le journal du photovoltaïque N° 7 – 2012. PHOTOVOLTAIC BAROMETER – EUROBSERVER – AVRIL 2012.
- [20] M. Liserre, T. Sauter, And J. Y. Hung, „Future energy systems. Integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics”, IEEE Industrial Electronics Magazine, March 2010, pp. 18-37.
- [21] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, „Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 53, NO. 5, OCTOBER 2006.