



Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering
Institute of Control & Industrial Electronics
Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland. Tel: +48226280665, Fax: +48226256633



Foundation for Polish Science

Sprzężanie OZE poprzez przekształtniki AC/DC współpracujące z siecią elektroenergetyczną w warunkach występujących zakłóceń

Marian P. Kaźmierkowski

Politechnika Warszawska

Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

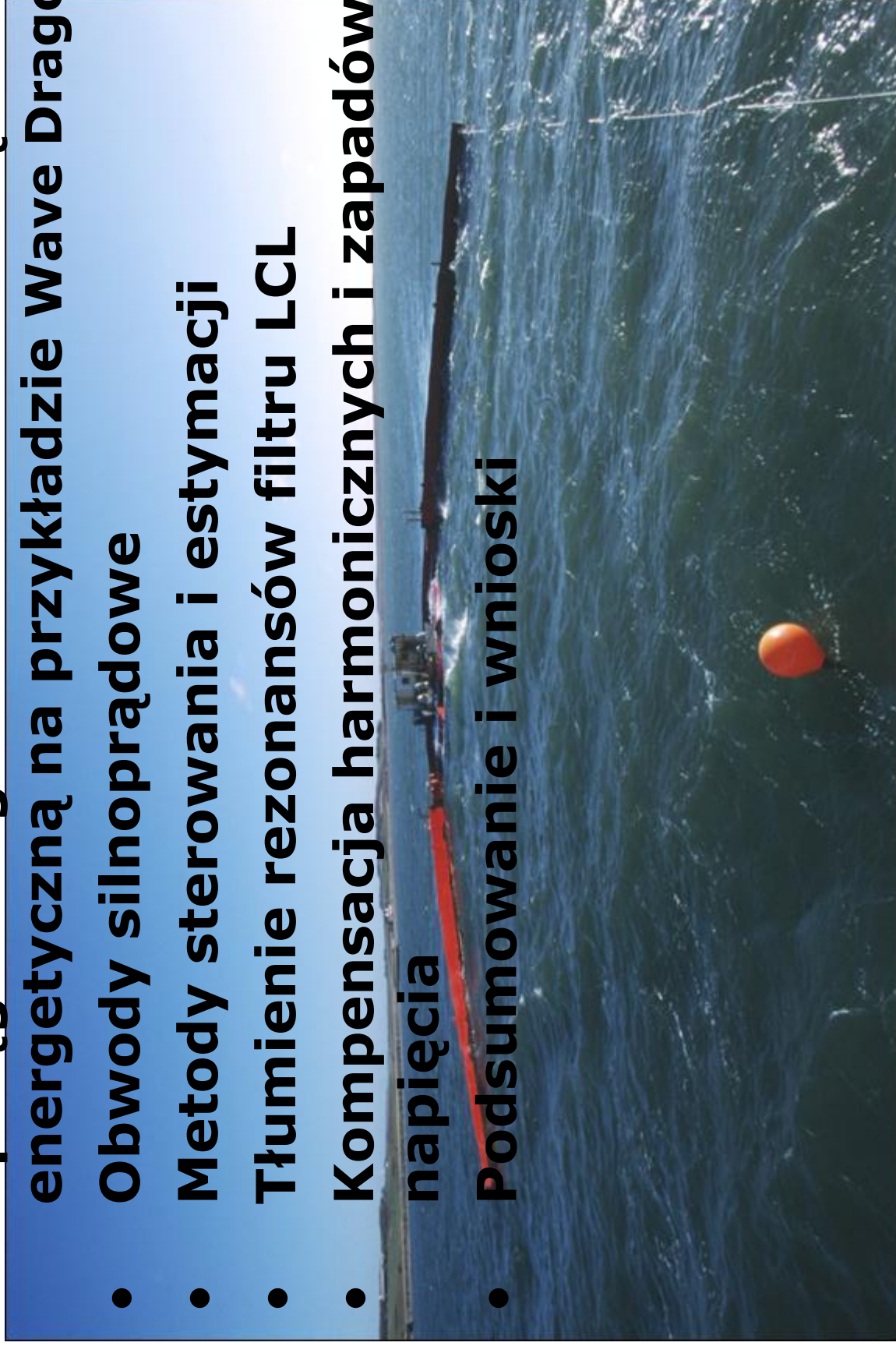
<http://www.isep.pw.edu.pl/ICG>





Plan

- **Wprowadzenie**
- **Sprzęgi energoelektroniczne z linią energetyczną na przykładzie Wave Dragon**
- **Obwody silnoprądowe**
- **Metody sterowania i estymacji**
- **Tłumienie rezonansów filtra LCL**
- **Kompensacja harmonicznych i zapadów napięcia**
- **Podsumowanie i wnioski**



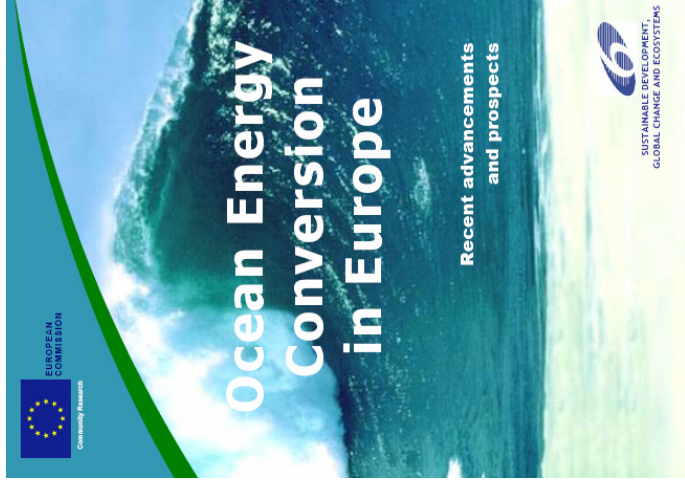


Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering
Institute of Control & Industrial Electronics
Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland. Tel: +48226280665, Fax: +48226256633



Wprowadzenie

- **Przekształcanie Energii Morskiej w Europie**



Osiągnięcia i Perspektywy

“Oceany i morza pokrywają 75% powierzchni ziemi a ich energia stanowi globalne źródło odnawialne. Istnieją różne formy tej energii:

- ▶ **Falowa,**
- ▶ Prądów morskich,
- ▶ Gradientów termicznych,
- ▶ Gradientów zasolenia,
- ▶ Pływów,
- ▶ I inne.

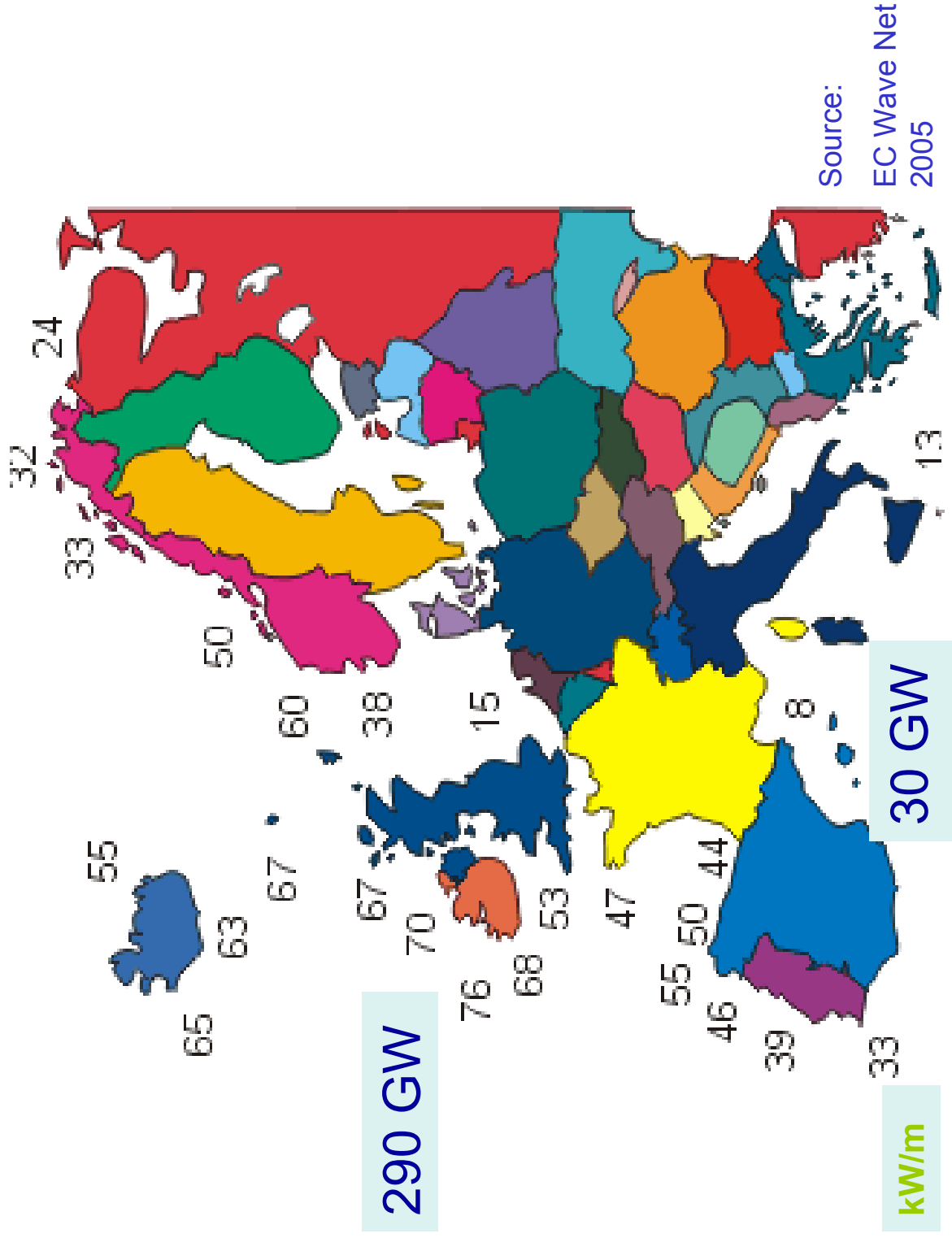
Aktualnie na świecie prowadzone są szerokie badania jak wykorzystać te źródła energii odnawialnej”



Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering
Institute of Control & Industrial Electronics
Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland. Tel: +48226280665, Fax: +48226256633



Rozkład średniej energii fal morskich w Europie



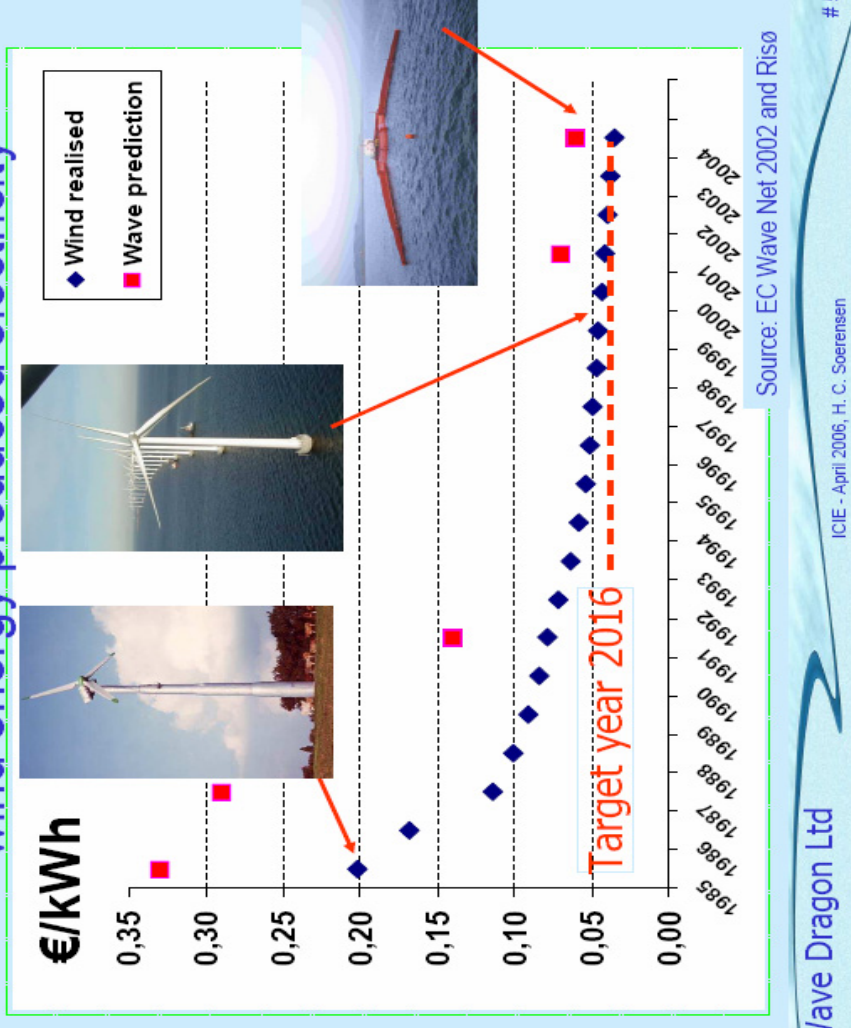
Poziom mocy fal morskich w kW/m bieżący fali



Stan Rozwoju Energetyki Falowej

- Koszt wytwarzania energii elektrycznej w siłowniach falowych osiąga aktualne średnią wartość poniżej 10 c€/kWh.
- To w porównaniu do średniej ceny energii wiatrowej w UE która wynosi około 4 c€/kWh, stanowi wysoki koszt.
- Jednakże przewiduje się znaczny spadek ceny wraz z rozwojem i upowszechnieniem tej technologii.

Predicted cost for wave energy compared to wind energy produced electricity





Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering
Institute of Control & Industrial Electronics
Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland. Tel: +48226280665, Fax: +48226256633



Siłownie morskie (Offshore Devices)

Wave Dragon

Wave Dragon jest pełnomorską siłownią przelewową opracowaną przez grupę firm kierowaną przez Wave Dragon ApS, Dania, <http://www.wavedragon.net>. Wykorzystuje ona opatentowany reflektor fal aby skupić fale na rampie i napętniać wyżej położony zbiornik. Energia elektryczna jest wytwarzana przez zbiór turbin Kaplan.





Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering
 Institute of Control & Industrial Electronics
 Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland. Tel: +48226280665, Fax: +48226256633

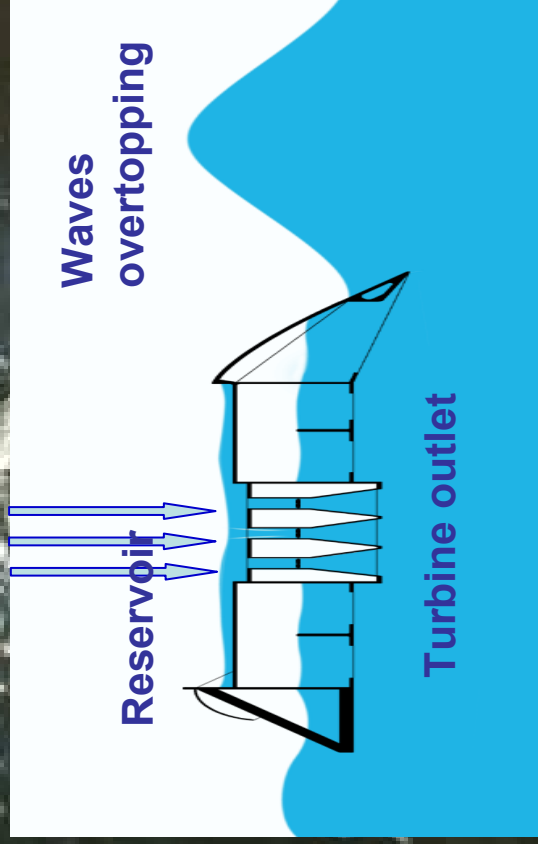


Wave Dragon – Prototype in 1:4.5 Scale

AALBORG UNIVERSITY



Nissum
 Bredning,
 Denmark
 The wave climate
 in scale 1:4.5 of
 the North Sea



ICSTEP 2006, Tamil Nadu, India



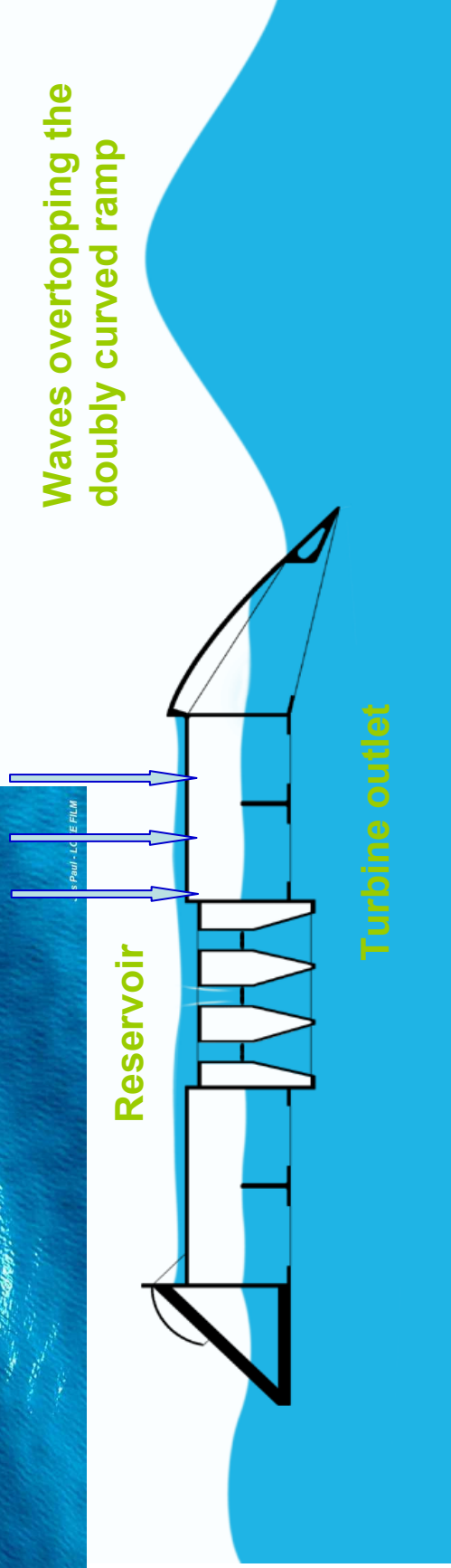
Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering
Institute of Control & Industrial Electronics
Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland. Tel: +48226280665, Fax: +48226256633

Zasada działania Wave Dragon

Wave Dragon może być użytkowany indywidualnie lub grupowo (farmy, parki) gdzie występują dobre warunki klimatyczne a głębokość wody wynosi co najmniej 25 m.

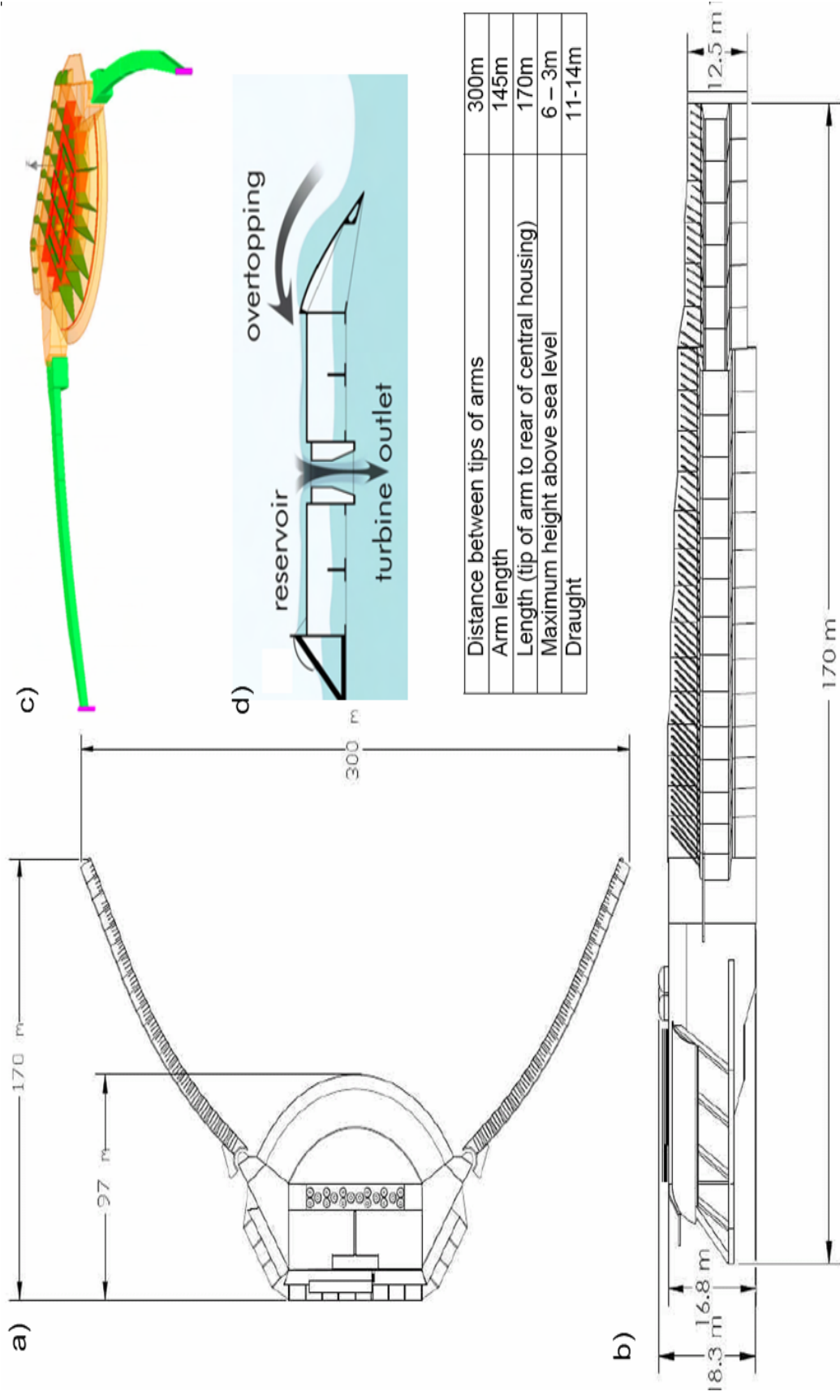


Klimat	Produkcja Energii
24 kW/m	12 GWh/y/unit
36 kW/m	20 GWh/y/unit
48 kW/m	35 GWh/y/unit





Wave Dragon MW



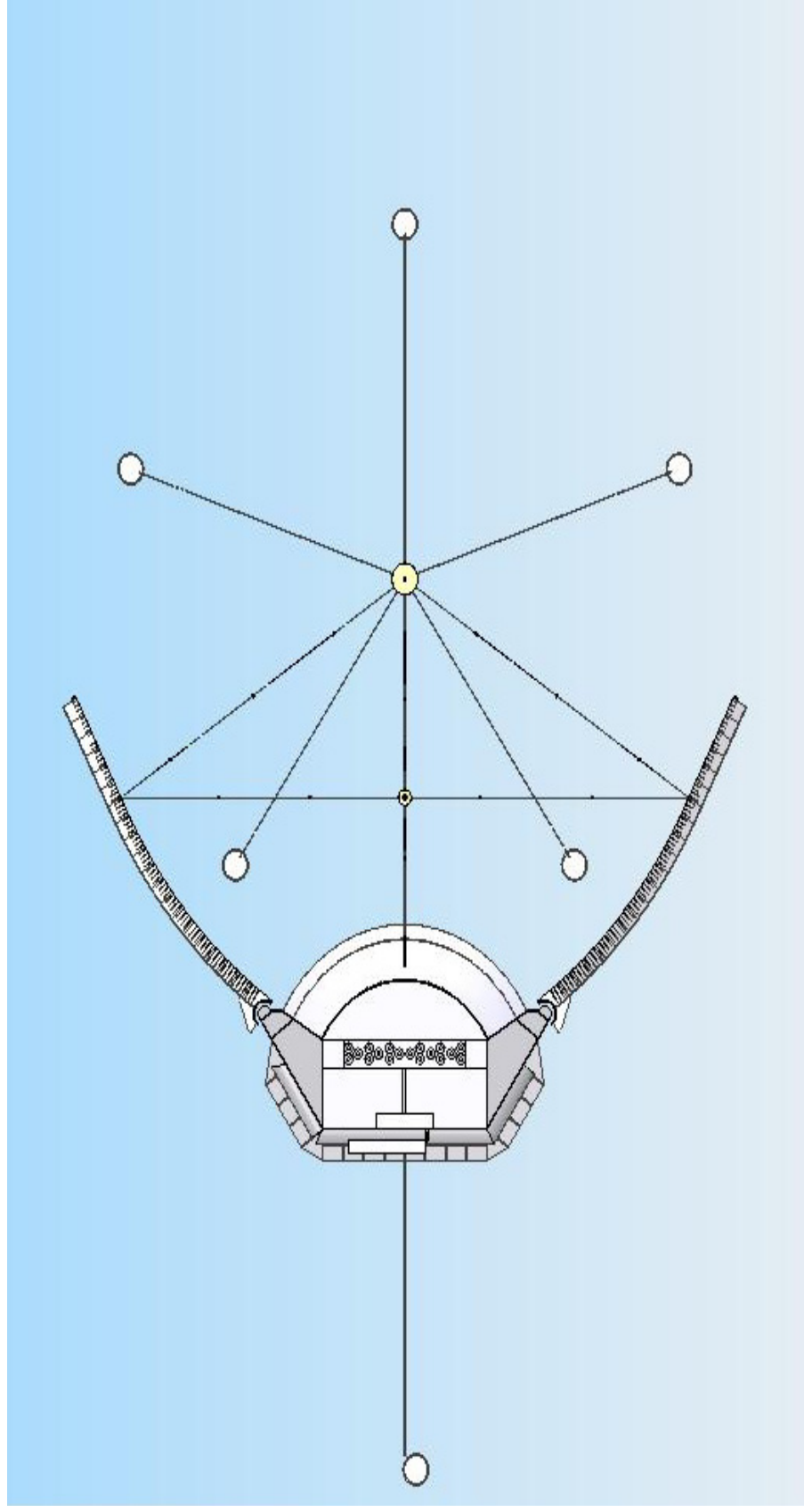
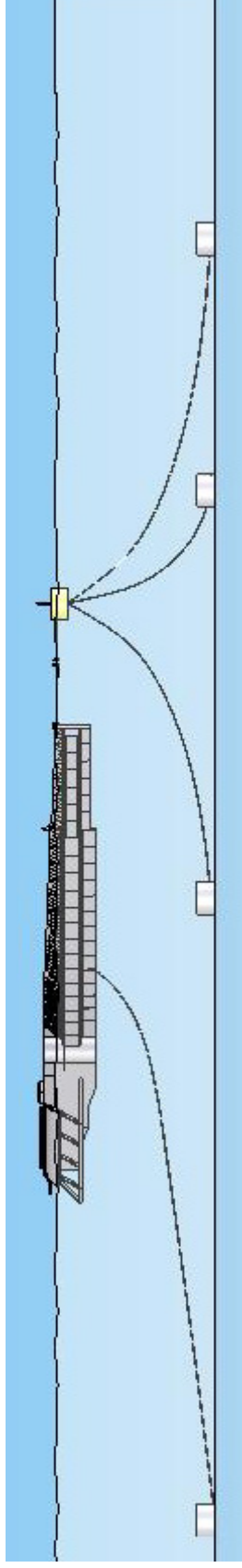


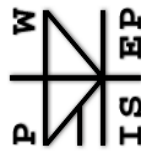
Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering
Institute of Control & Industrial Electronics
Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland. Tel:+48226280665, Fax:+48226256633



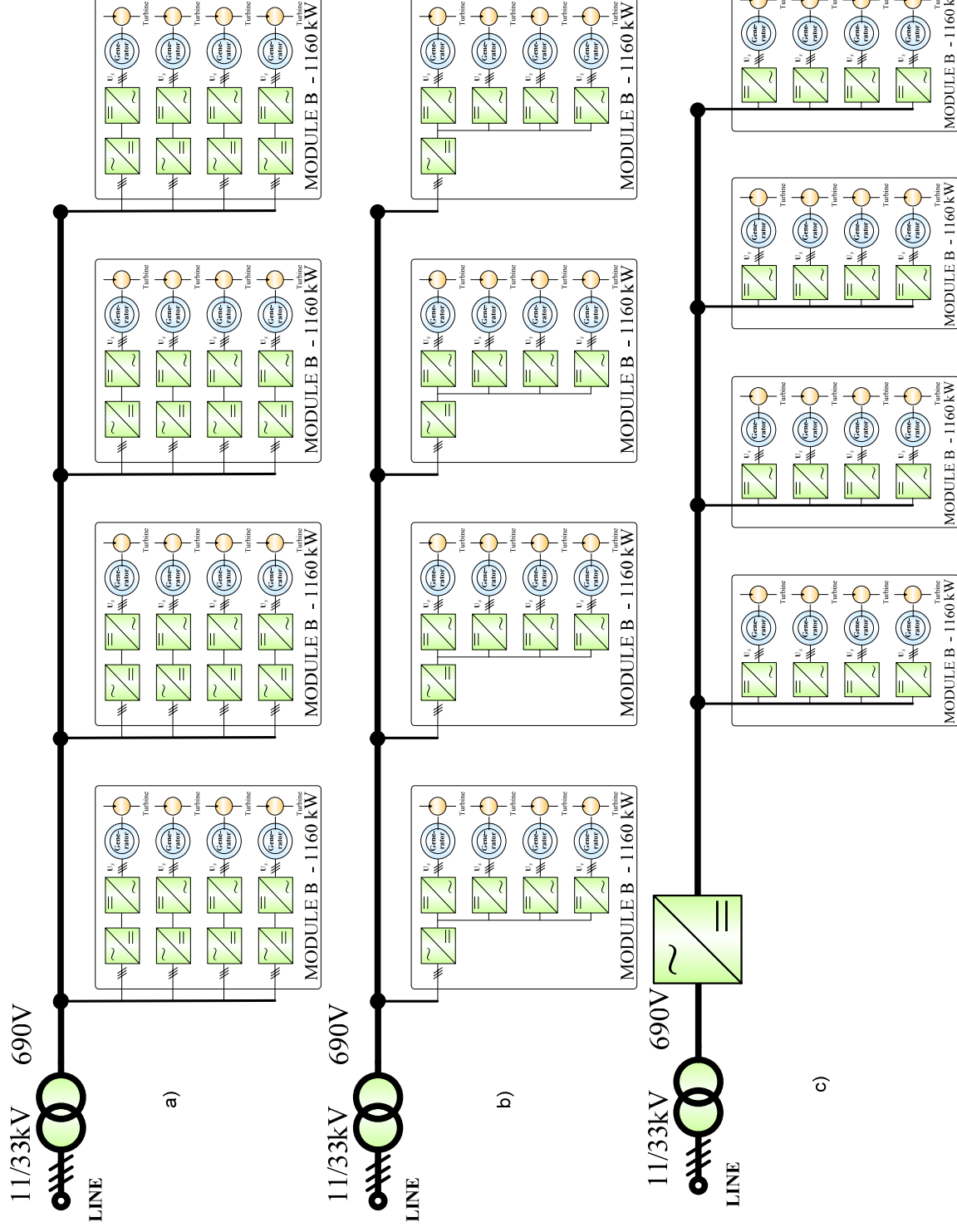
Mooring principle

Wave Dragon Ltd

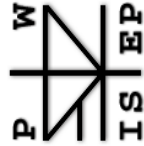




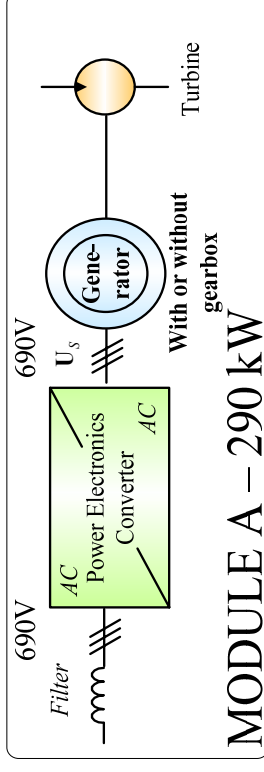
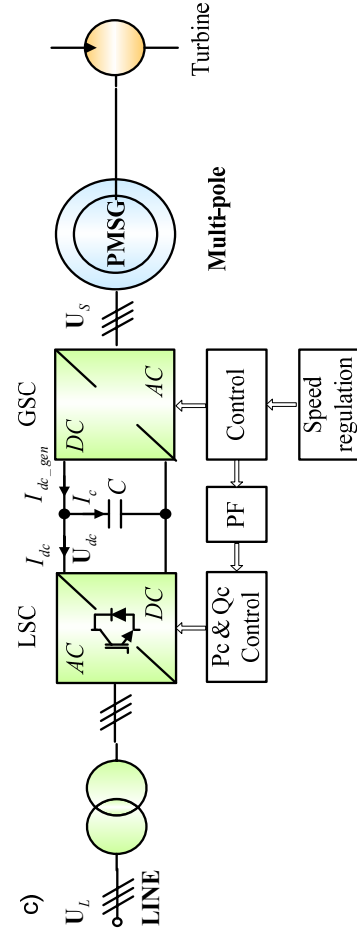
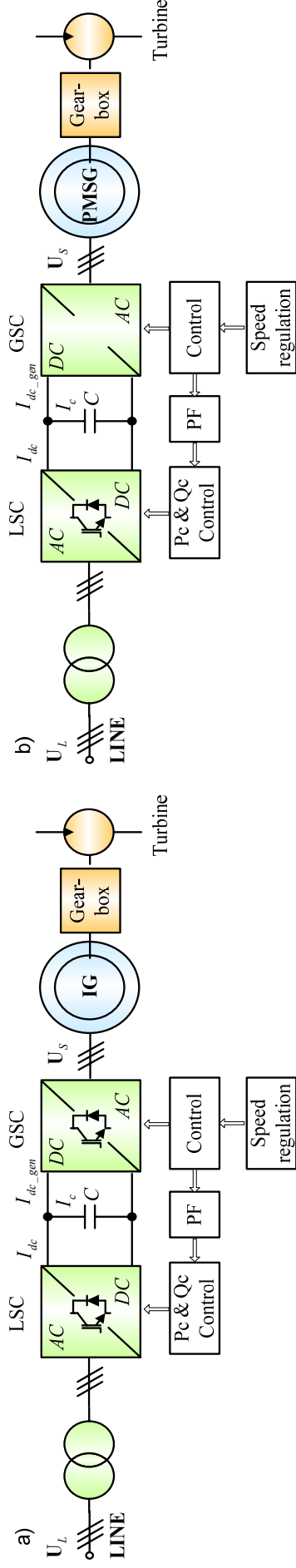
Sprzęg Energoelektroniczny z Linią Energetyczną



System zawiera 16 prądnic sprzężonych z linią poprzez: a) indywidualny przekształtnik AC/DC/AC; b) jeden przekształtnik AC/DC dla grupy 4 prądnic; c) jeden przekształtnik AC/DC dla grupy 16 prądnic



Prądnice i Przekształtniki Ergoelektroniczne



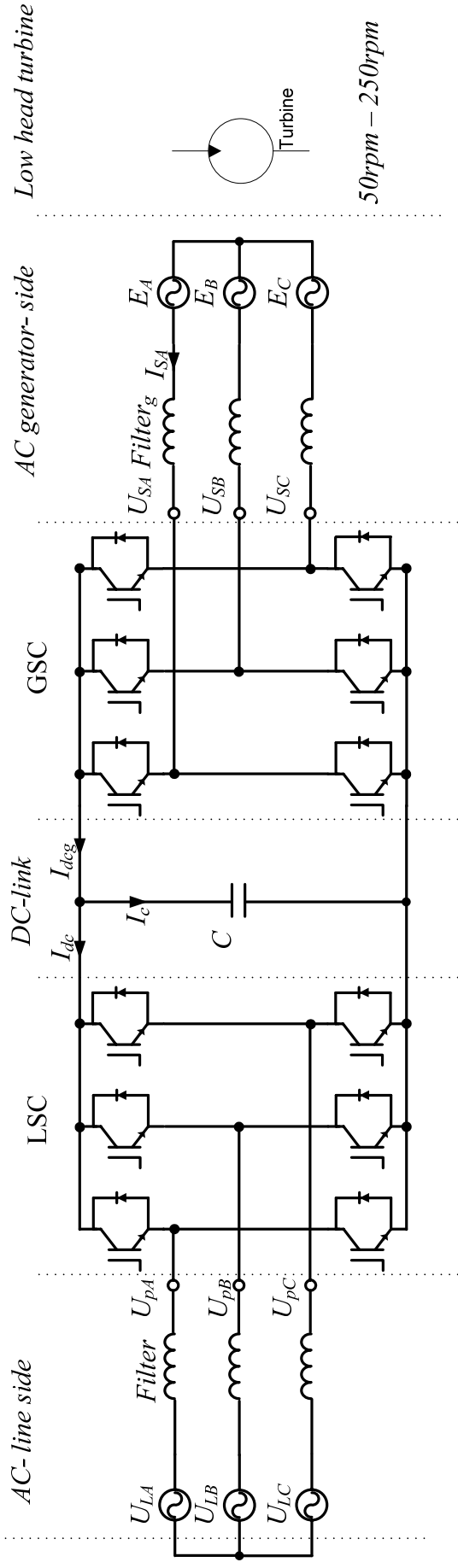
System turbiny z przekształtnikiem oraz: a) Prądnicą indukcyjną (IG) z przekładnią; b) Prądnicą Synchroniczną o Magnesach Trwałych (PMSG) i przekładnią; c) Wielobiegunowa Prądnica Synchroniczna o Magnesach Trwałych (PMSG) – Rozwiązanie preferowane dla Wave Dragon MW d) symbol ogólny MODUŁ A;

LSC – przekształtnik od strony sieci

GSC – przekształtnik od strony prądnicy



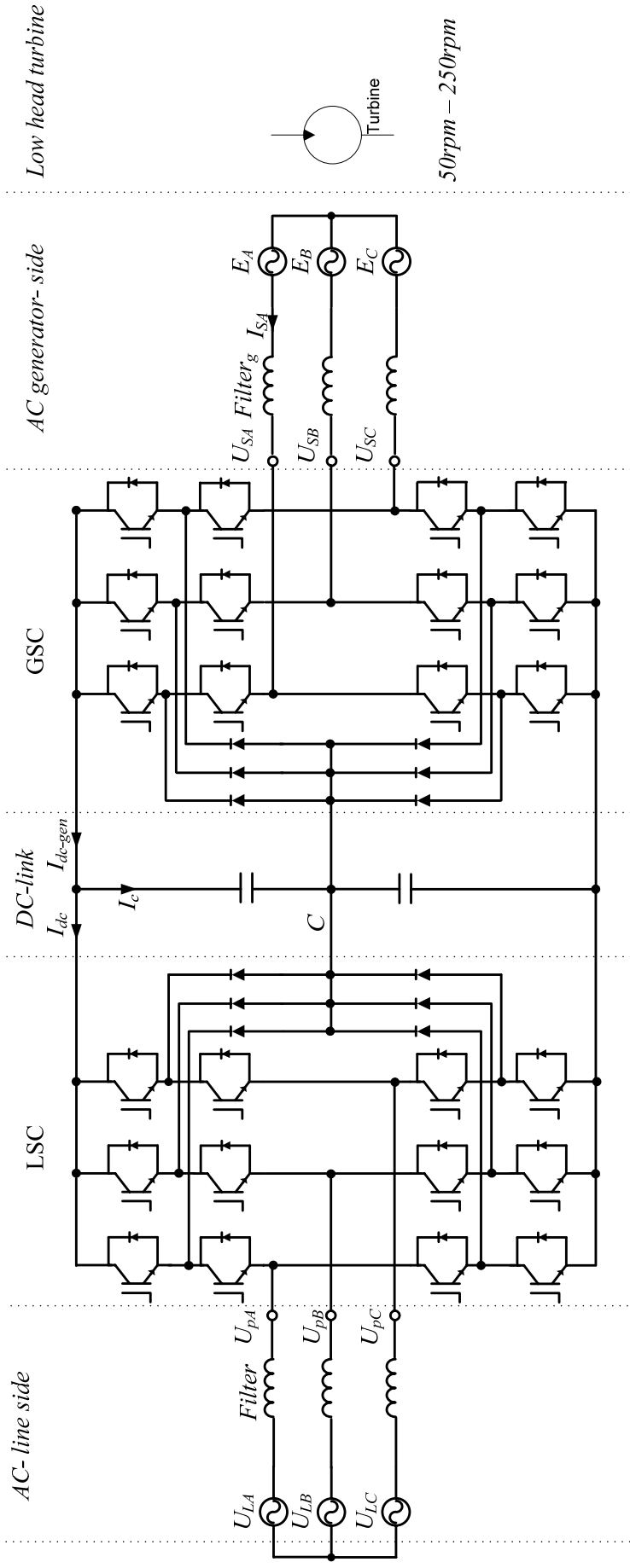
Przekształtnik AC/DC/AC Dwupoziomowy



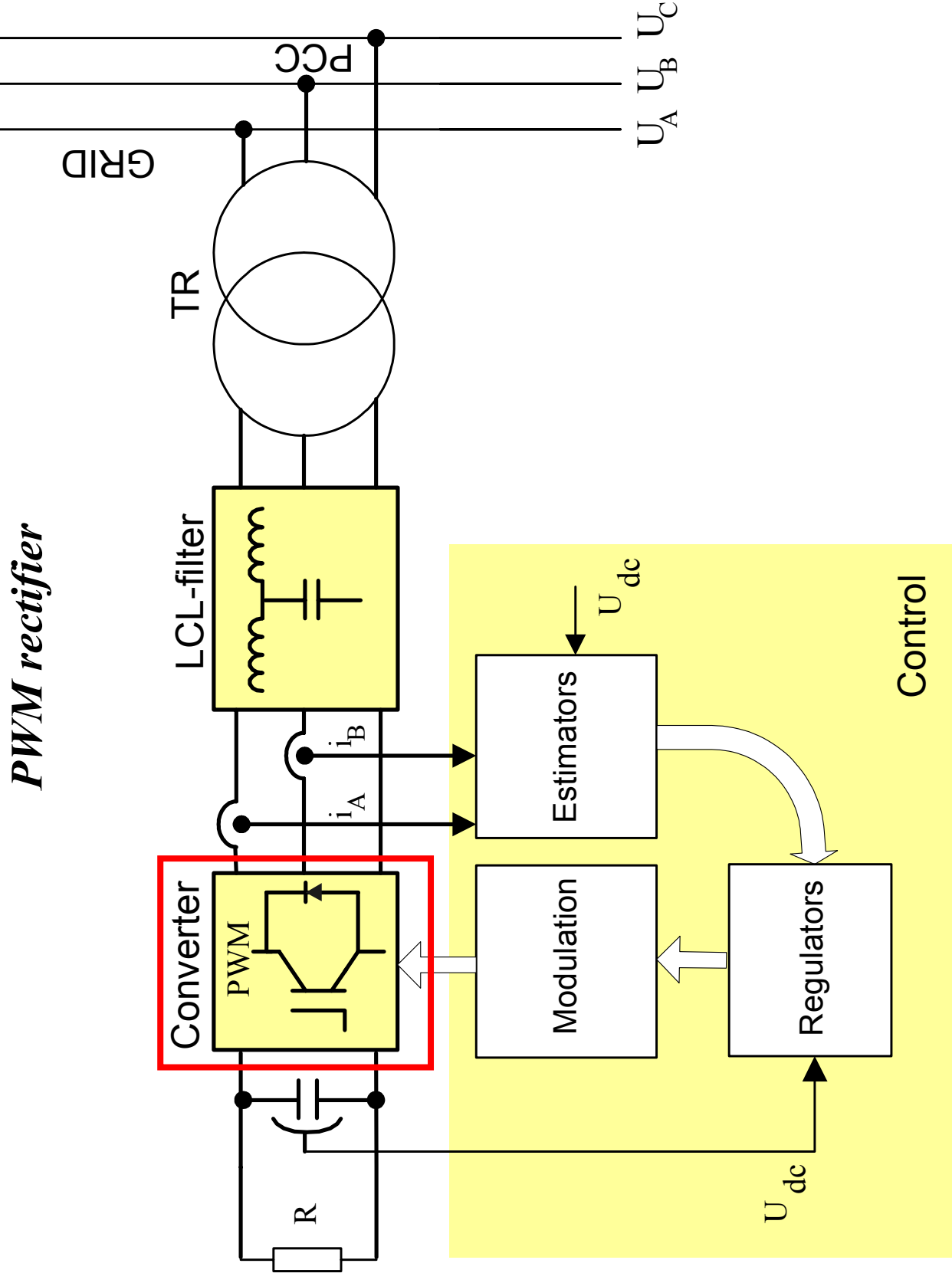
- Praca 4-kwadrantowa
- Możliwość współpracy zarówno PMSG jak też z IG
- Możliwe zaawansowane metody sterowania zarówno przekształtnika od strony sieci (LSC) jak też prądnicy (GSC).



Przekształtnik AC/DC/AC 3-Poziomowy

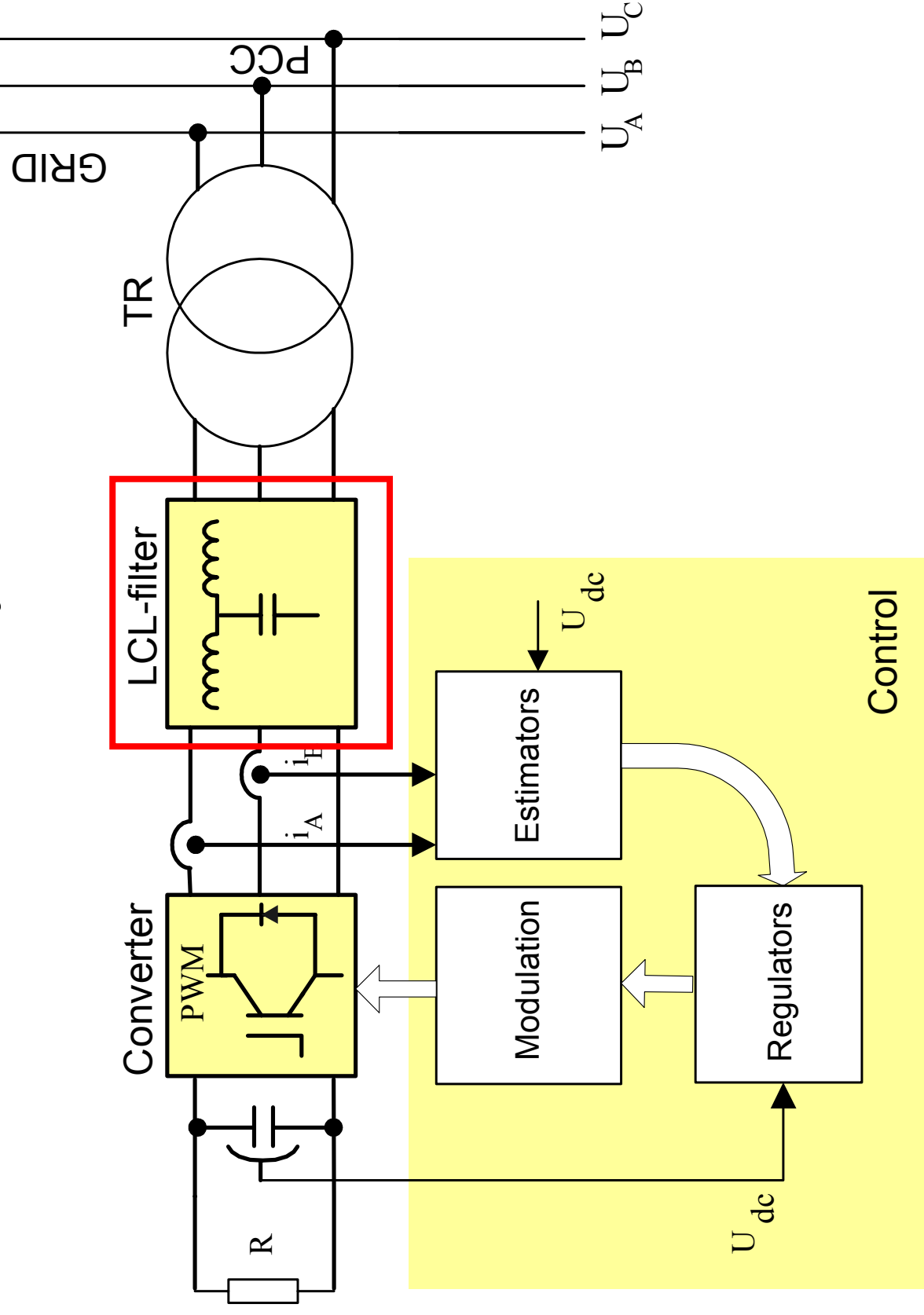


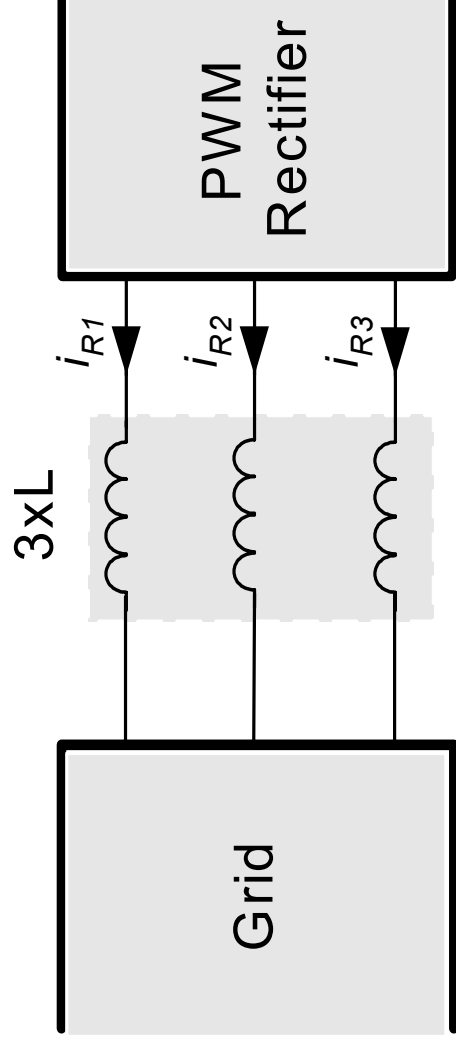
- Praca 4-kwadrantowa
- Możliwość współpracy zarówno PMSG jak też z IG
- Możliwe zaawansowane metody sterowania zarówno przekształtnika od strony sieci (LSC) jak też prądnicy (GSC)
- **Możliwość pracy przy wyższych napięciach**





PWM rectifier





- to fulfill IEEE 519-1992 standards – huge inductor should be applied between PWM rectifier and grid to reduce harmonics around switching frequency and multiplication of switching frequency,
- It is bulky and expensive solution,
- It reduce dynamics and operation range.
- Large voltage drop.



Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering
 ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, Tel: +48226280665, Fax: +48226256633

Warsaw University of Technology, Institute of Control & Industrial Electronics
 ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, Tel: +48 22 660 5485/Fax: +48 22 625 6633,
 www.pw.edu.pl, www.isep.pw.edu.pl

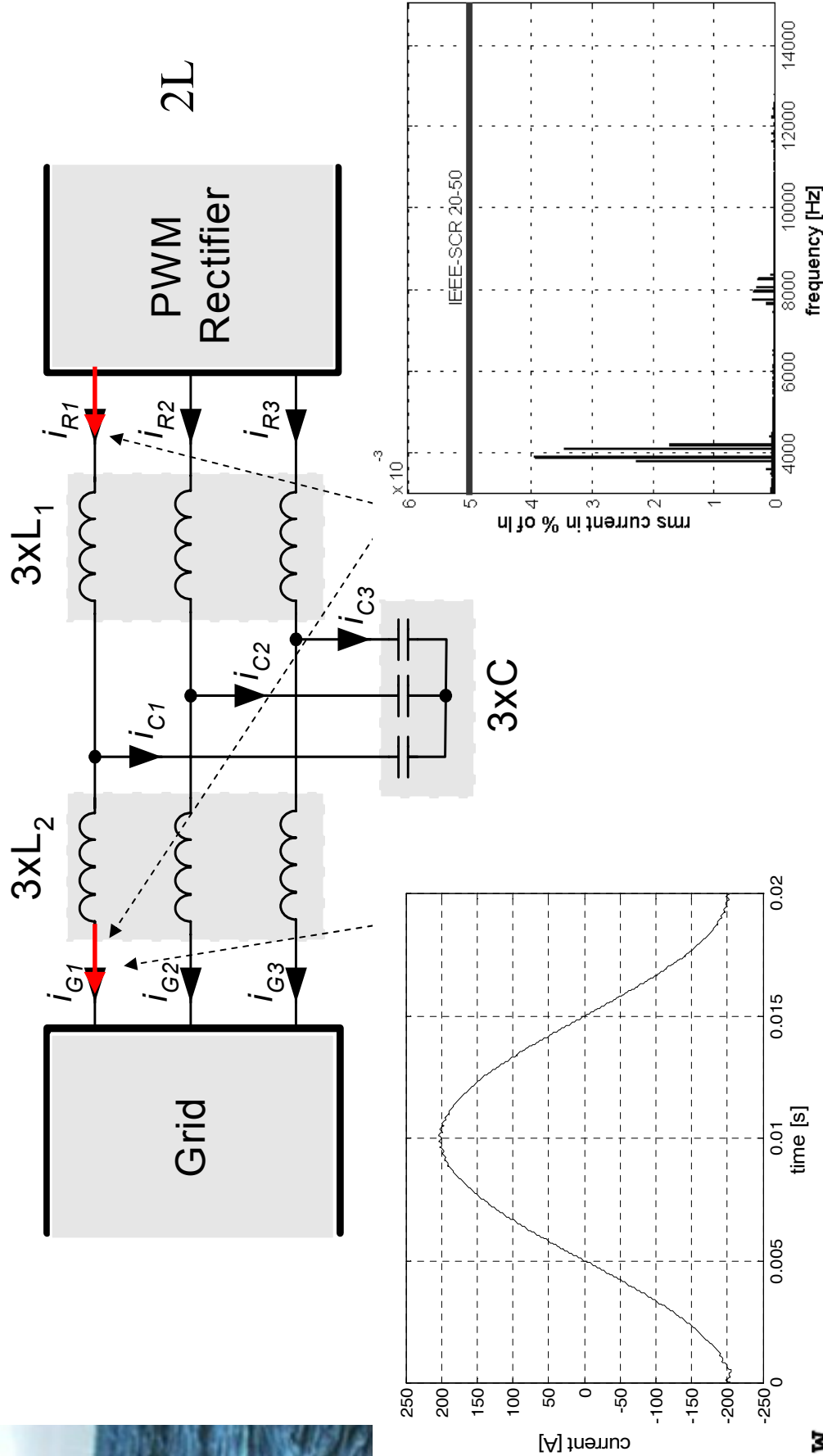
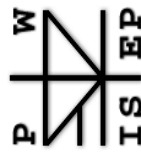
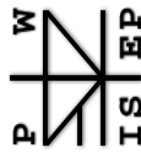
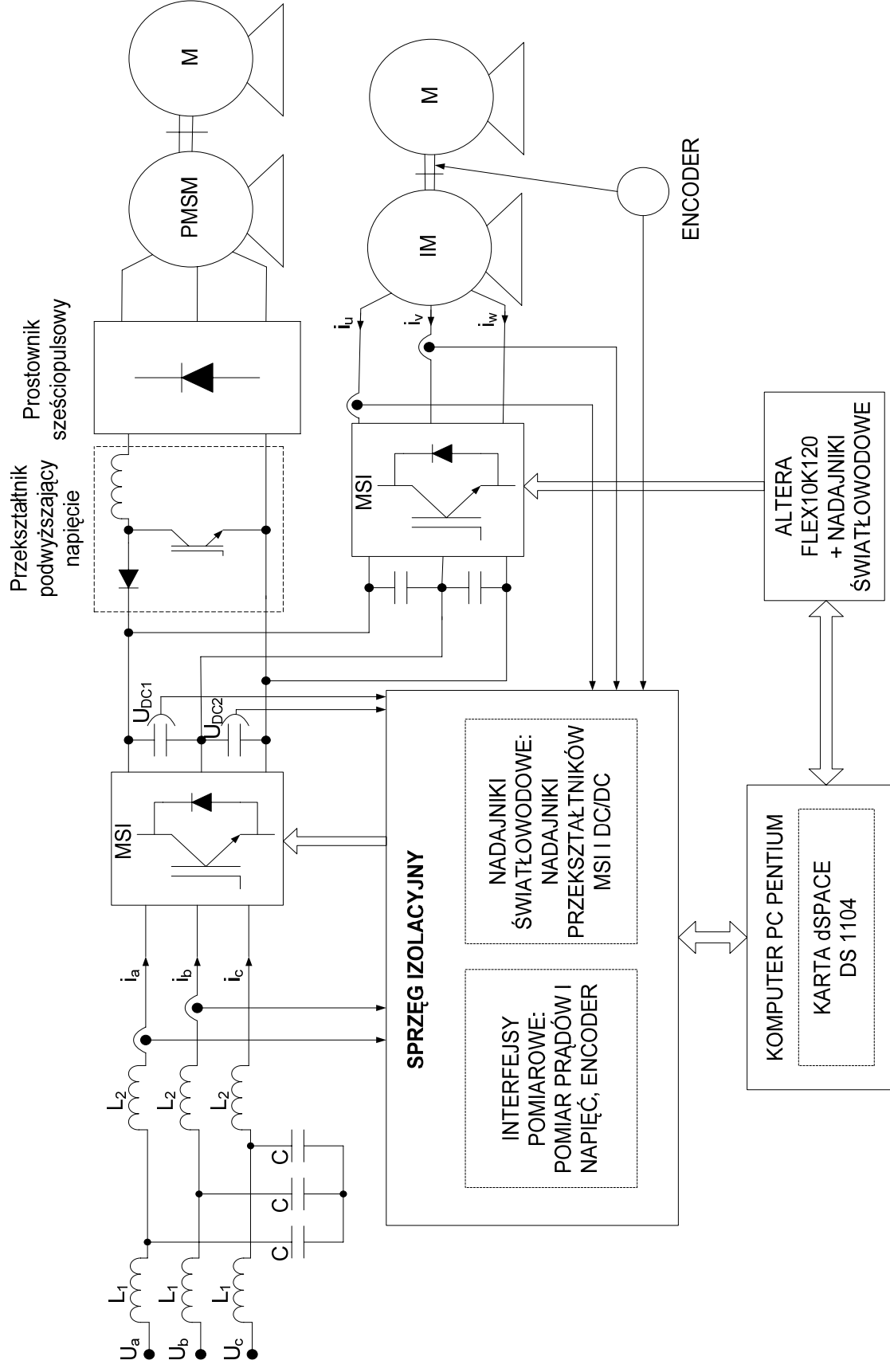


Fig. Grid current of 2-level rectifier with LCL filter ($L1 = 0,4\text{mH}$; $L2 = 0.32\text{mH}$; $C = 100\text{mF}$; $f_s = 4\text{kHz}$)
 Fig. Harmonic spectrum of grid current together with IEEE-SCR 20-50 recommendation 2-level
 rectifier with LCL filter



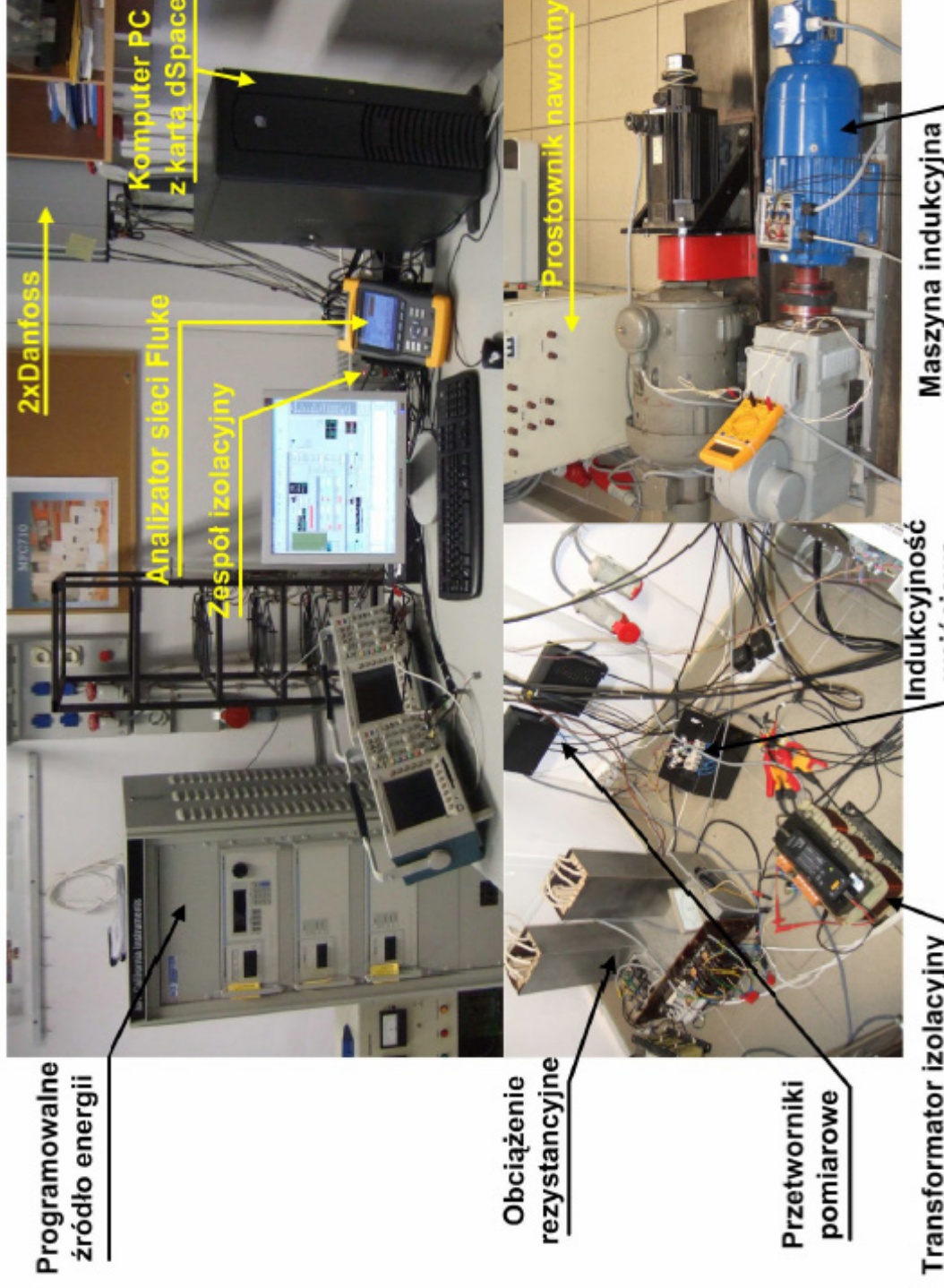


Budowa stanowiska eksperymentalnego





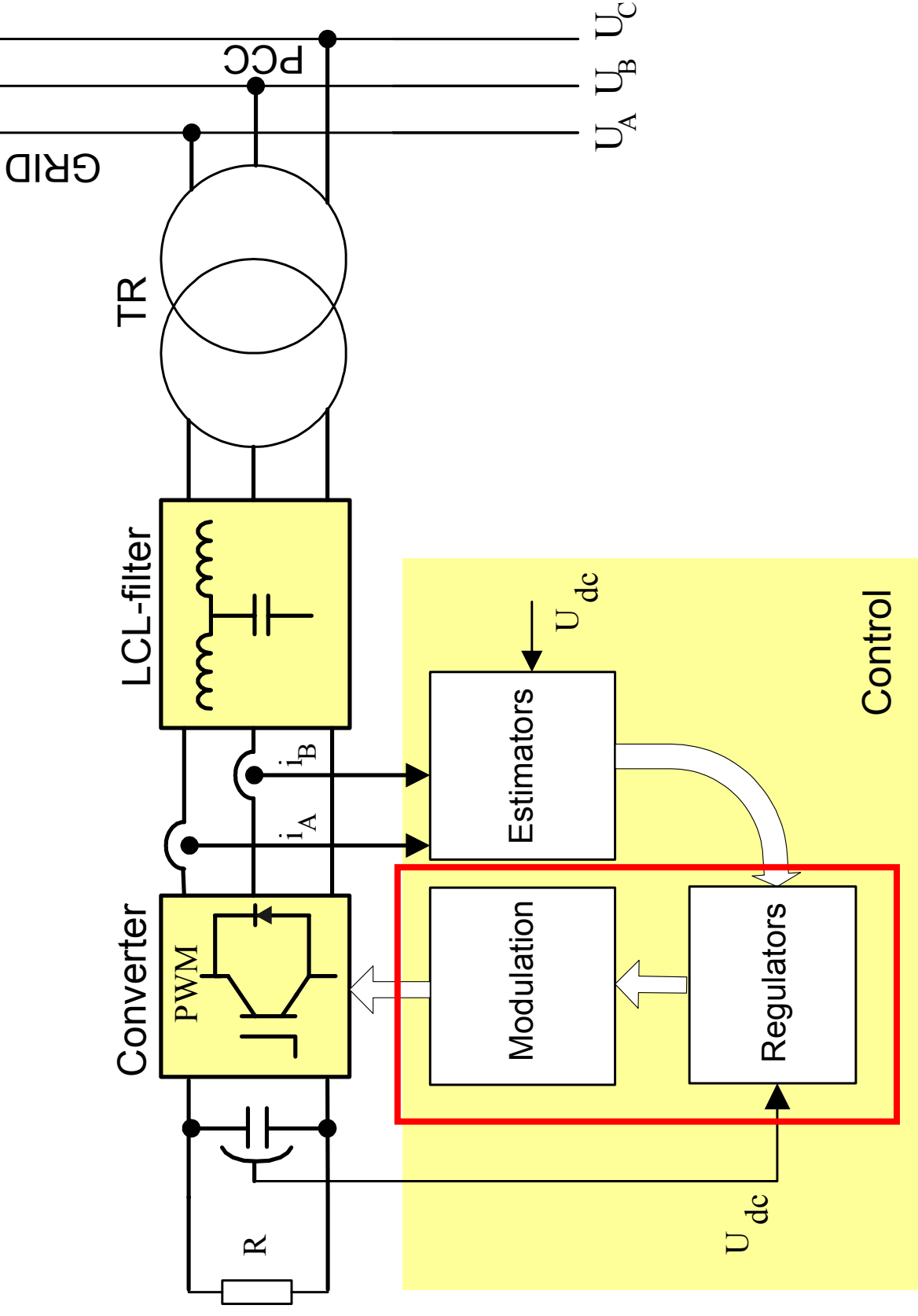
Wyniki Badań Eksperymentalnych



Widok Stanowiska Laboratoryjnego

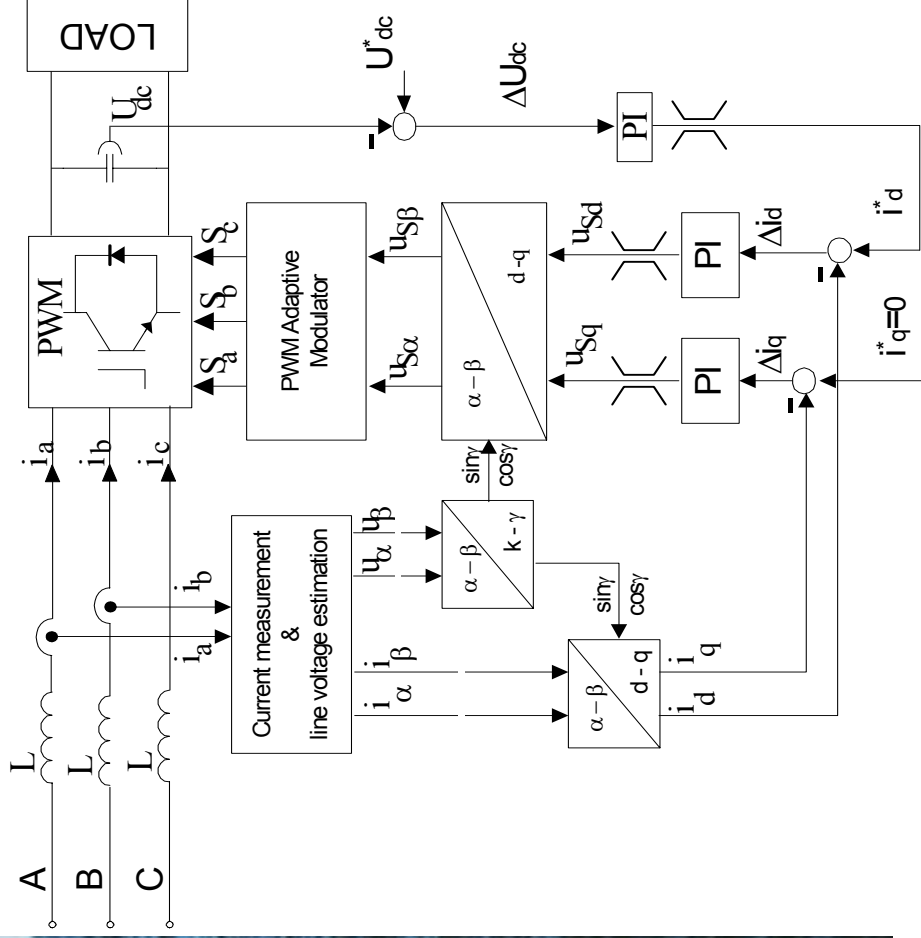


PWM rectifier

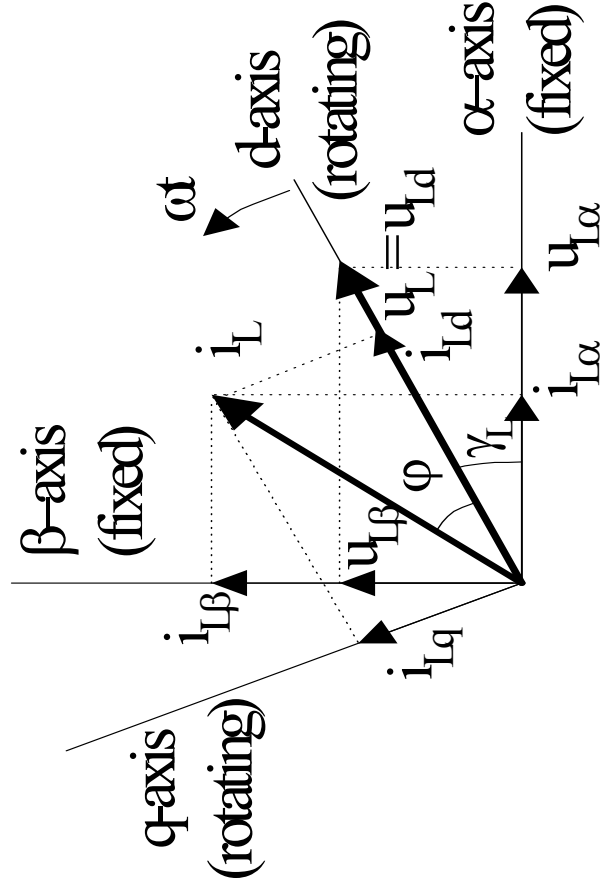




Voltage Oriented Control (VOC)



$$\sin\gamma_{UL} = U_{L\beta} / \sqrt{(U_{L\alpha})^2 + (U_{L\beta})^2}$$



$$u_{Ld} = R \cdot i_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} + u_{Sd} - \omega_s \cdot L \cdot i_{Lq}$$

$$u_{Lq} = R \cdot i_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} + u_{Sq} + \omega_s \cdot L \cdot i_{Ld}$$

Block scheme of VOC with coordinate transformation of current, line and rectifier voltage from fixed α - β coordinates to rotating d-q coordinates.



Instantaneous power estimation based on line voltage

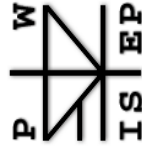
$$p = L \left(\frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + U_{dc} (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ 3L \left(\frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) - U_{dc} [S_a (i_b - i_c) + S_b (i_c - i_a) + S_c (i_a - i_b)] \right\}$$

$$\begin{bmatrix} u_{L\alpha} \\ u_{L\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{i_{L\alpha}^2 + i_{L\beta}^2} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} - i_{L\beta} & p \\ i_{L\beta} & i_{L\alpha} & q \end{bmatrix}$$

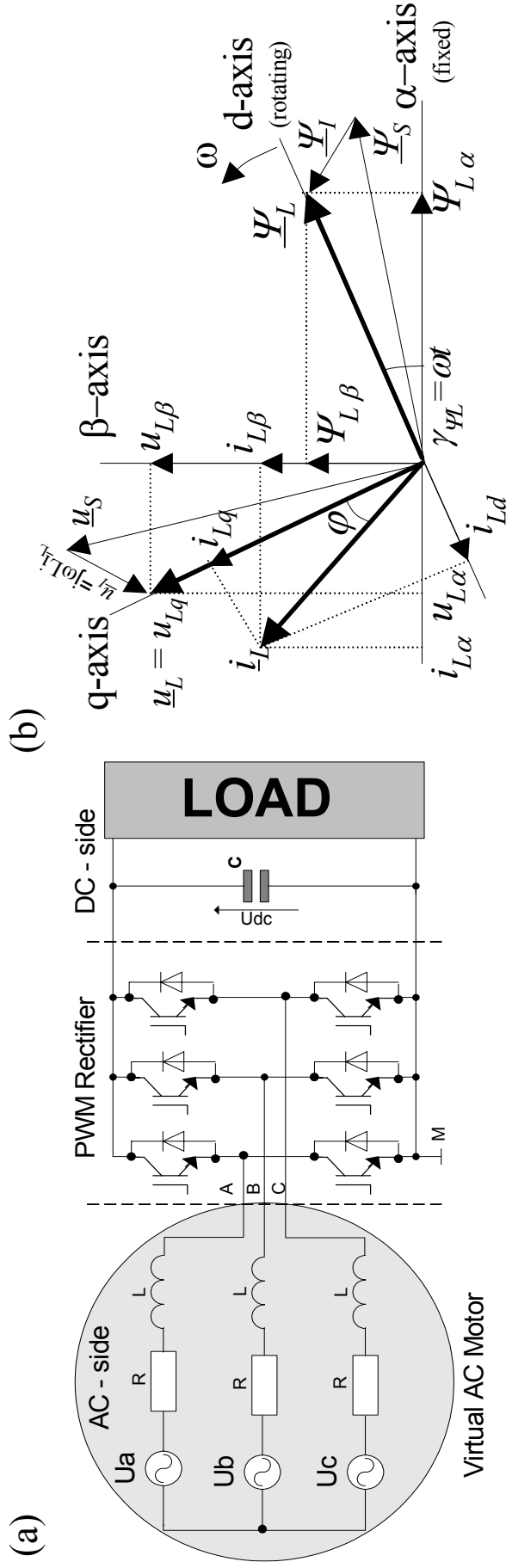
In spite of the simplicity of power estimation, this solution possesses several disadvantages such as:

- High values of the inductance and sampling frequency are needed (important point for the estimator, because a smooth shape of current is needed).
- Power estimation depends on the switching state. Therefore calculation of the power and voltage should be avoided at the moment of switching, because this gives high errors of the estimated values.





Virtual flux estimator



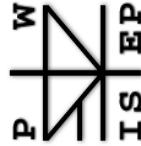
$$\underline{\Psi}_L = \begin{bmatrix} \Psi_{L\alpha} \\ \Psi_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int u_{L\alpha} dt \\ \int u_{L\beta} dt \end{bmatrix}$$

$$\underline{\Psi}_L = \underline{\Psi}_S + \underline{\Psi}_I$$

$$\Psi_{L\alpha} = \int \left(\sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} \left(D_A - \frac{1}{2} (D_B + D_C) \right) dt + Li_{L\alpha} \right)$$

$$\Psi_{L\beta} = \int \left(\frac{1}{\sqrt{2}} U_{dc} (D_B - D_C) \right) dt + Li_{L\beta}$$

- (a) Three-phase PWM rectifier system with AC-side presented as virtual AC motor.
- (b) Reference coordinates and vectors: $\underline{\Psi}_L$ – virtual line flux vector, $\underline{\Psi}_S$ – virtual flux vector of converter, $\underline{\Psi}_I$ – virtual flux vector of inductor, \underline{u}_S – converter voltage vector, \underline{u}_L – line voltage vector, \underline{u}_I – inductance voltage vector, \underline{i}_L – line current vector





Active and reactive power estimator

Using complex notation, the instantaneous power can be calculated as follows:

$$p = \text{Re}(\underline{u}_L \cdot \underline{i}_L^*) \quad \text{where } * \text{ denotes the conjugate line current vector.}$$

$$q = \text{Im}(\underline{u}_L \cdot \underline{i}_L^*)$$

The line voltage can be expressed by the virtual flux (VF) as

$$\underline{u}_L = \frac{d}{dt} \underline{\Psi}_L = \frac{d}{dt} (\underline{\Psi}_L e^{j\omega t}) = \frac{d\underline{\Psi}_L}{dt} e^{j\omega t} + j\omega \underline{\Psi}_L e^{j\omega t} = \frac{d\underline{\Psi}_L}{dt} e^{j\omega t} + j\omega \underline{\Psi}_L$$

where $\underline{\Psi}_L$ denotes the space vector and Ψ_L its amplitude. For VF-oriented quantities, in α - β

$$\underline{i}_L^* = \left\{ \left. \begin{aligned} \frac{d\underline{\Psi}_L}{dt} \Big|_{\alpha} + j \frac{d\underline{\Psi}_L}{dt} \Big|_{\beta} \\ + j\omega (\Psi_{L\alpha} + j\Psi_{L\beta}) \end{aligned} \right\} (i_{L\alpha} - ji_{L\beta})$$

That gives

$$p = \left\{ \left. \begin{aligned} \frac{d\underline{\Psi}_L}{dt} \Big|_{\alpha} i_{L\alpha} + \frac{d\underline{\Psi}_L}{dt} \Big|_{\beta} i_{L\beta} + \omega (\Psi_{L\alpha} i_{L\beta} - \Psi_{L\beta} i_{L\alpha}) \end{aligned} \right\}$$

$$q = \left\{ \left. \begin{aligned} \frac{d\underline{\Psi}_L}{dt} \Big|_{\alpha} i_{L\beta} + \frac{d\underline{\Psi}_L}{dt} \Big|_{\beta} i_{L\alpha} + \omega (\Psi_{L\alpha} i_{L\alpha} + \Psi_{L\beta} i_{L\beta}) \end{aligned} \right\}$$

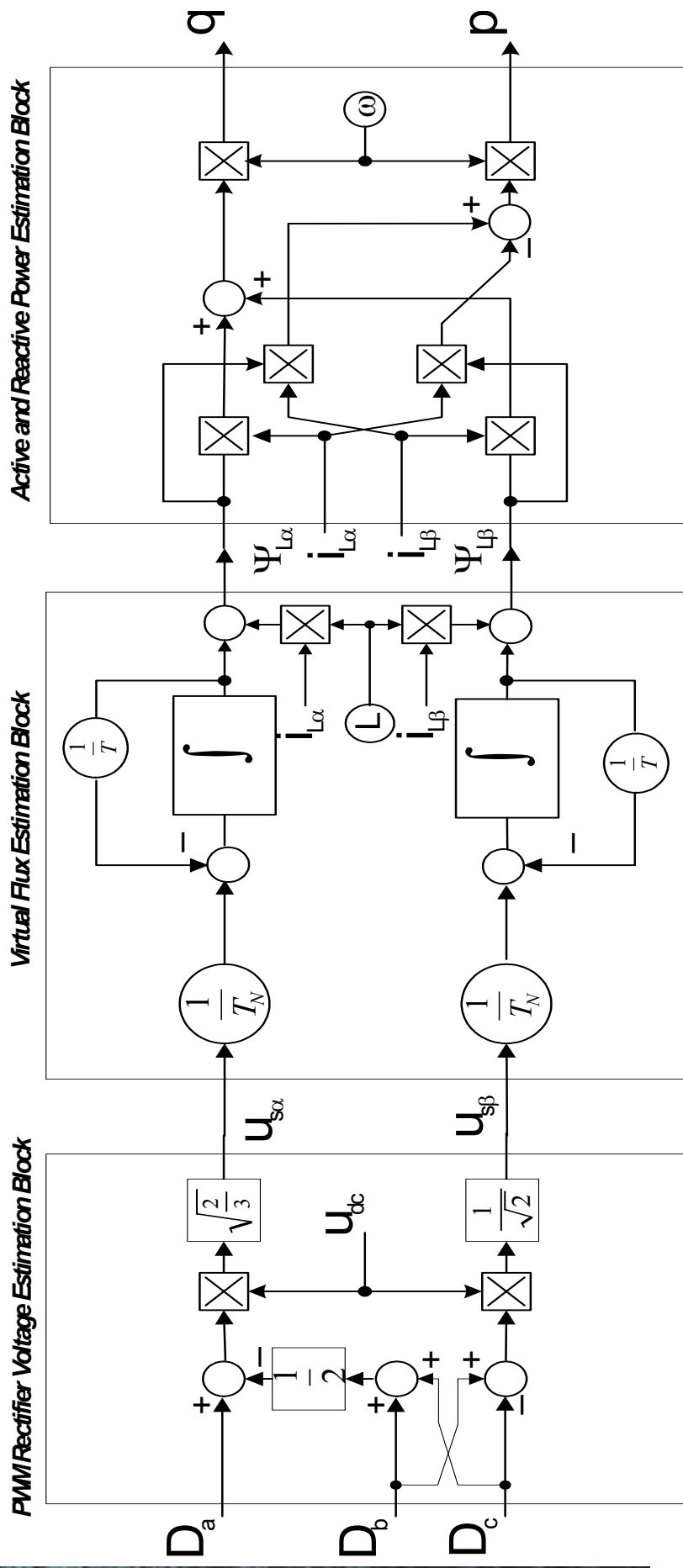
For sinusoidal and balanced line voltage powers can be computed as

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

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

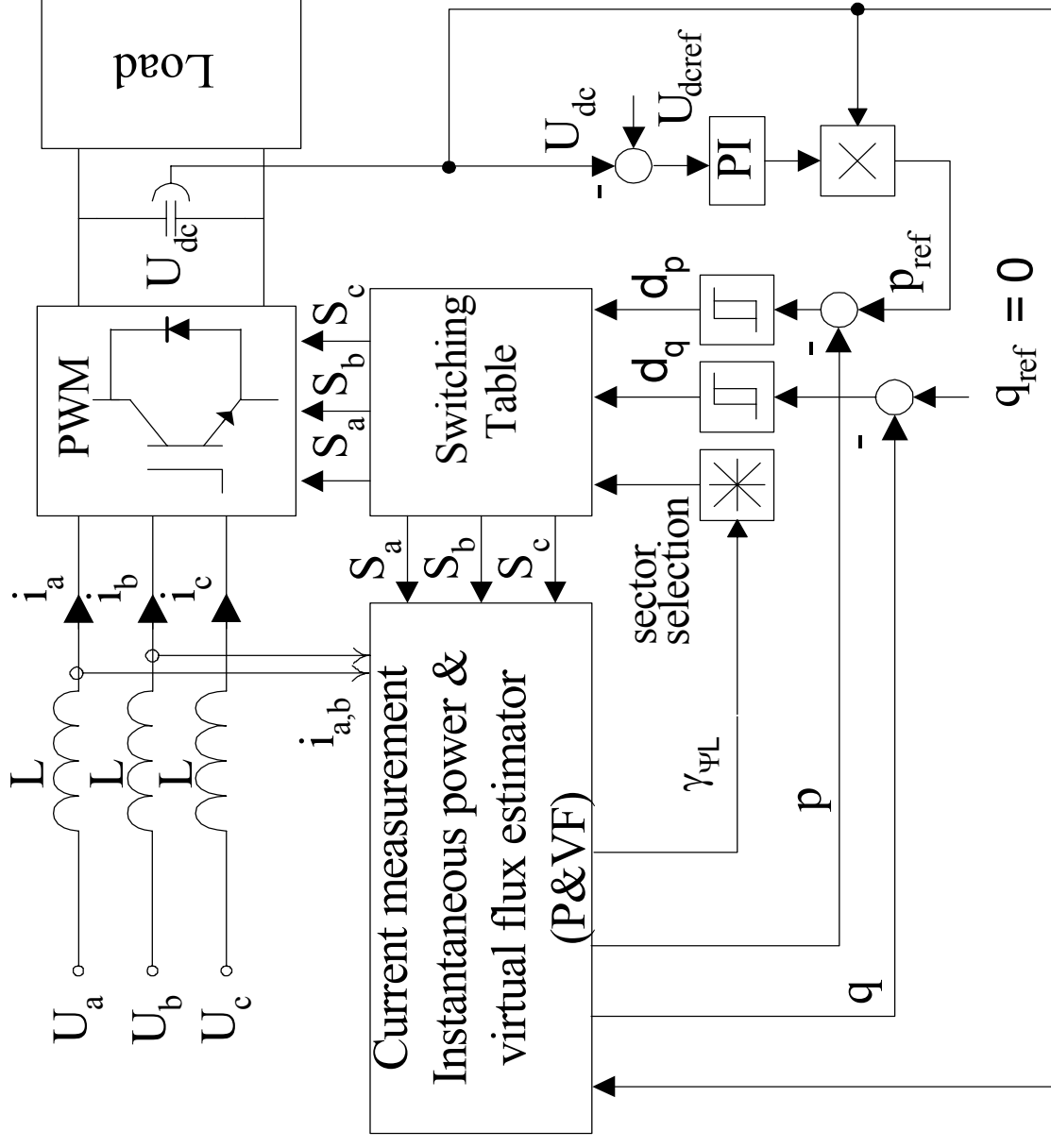


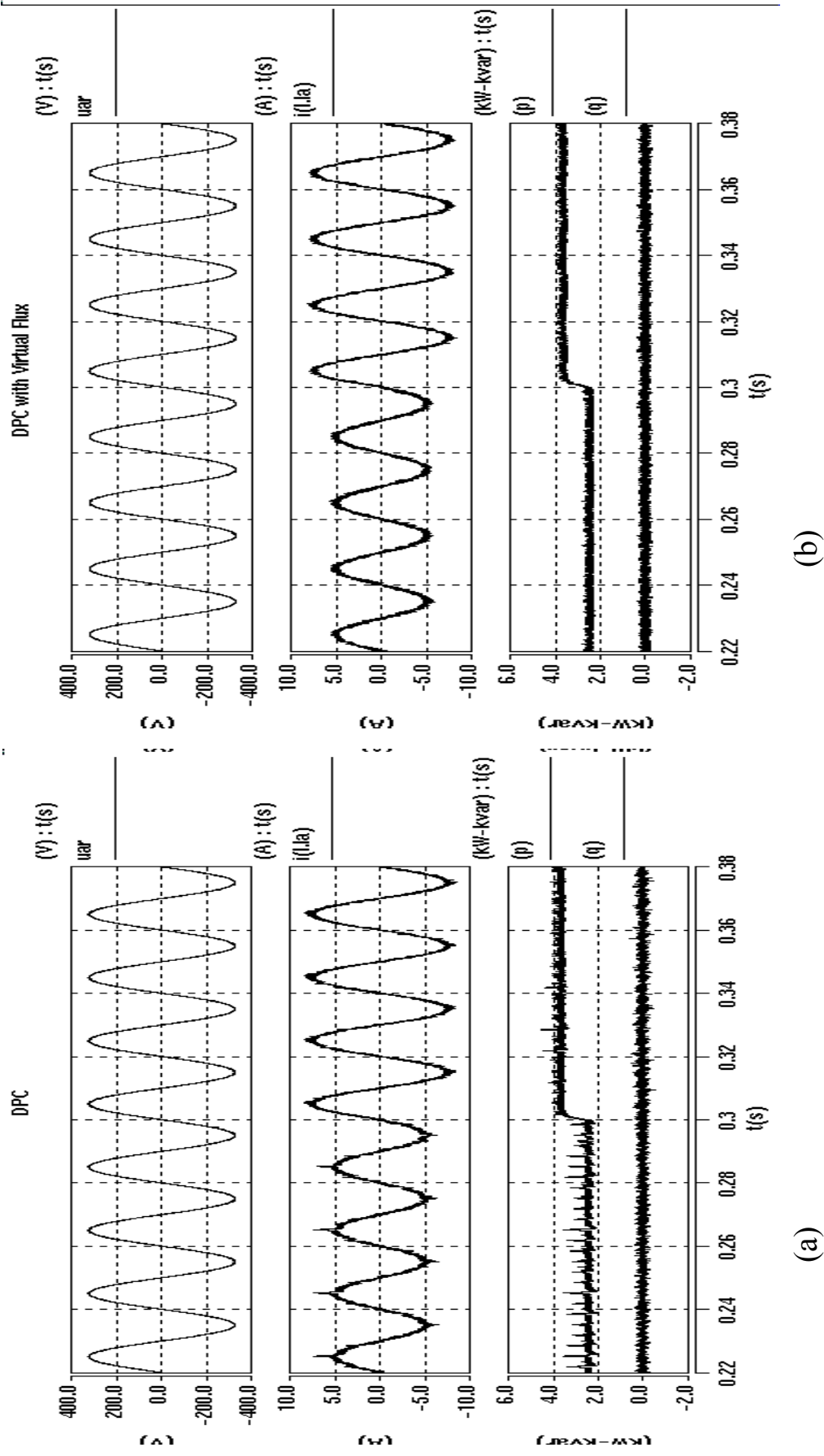
Block scheme of DPC-SVM estimators (P&VF)





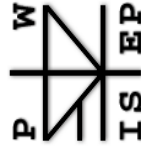
Direct Power Control (DPC)

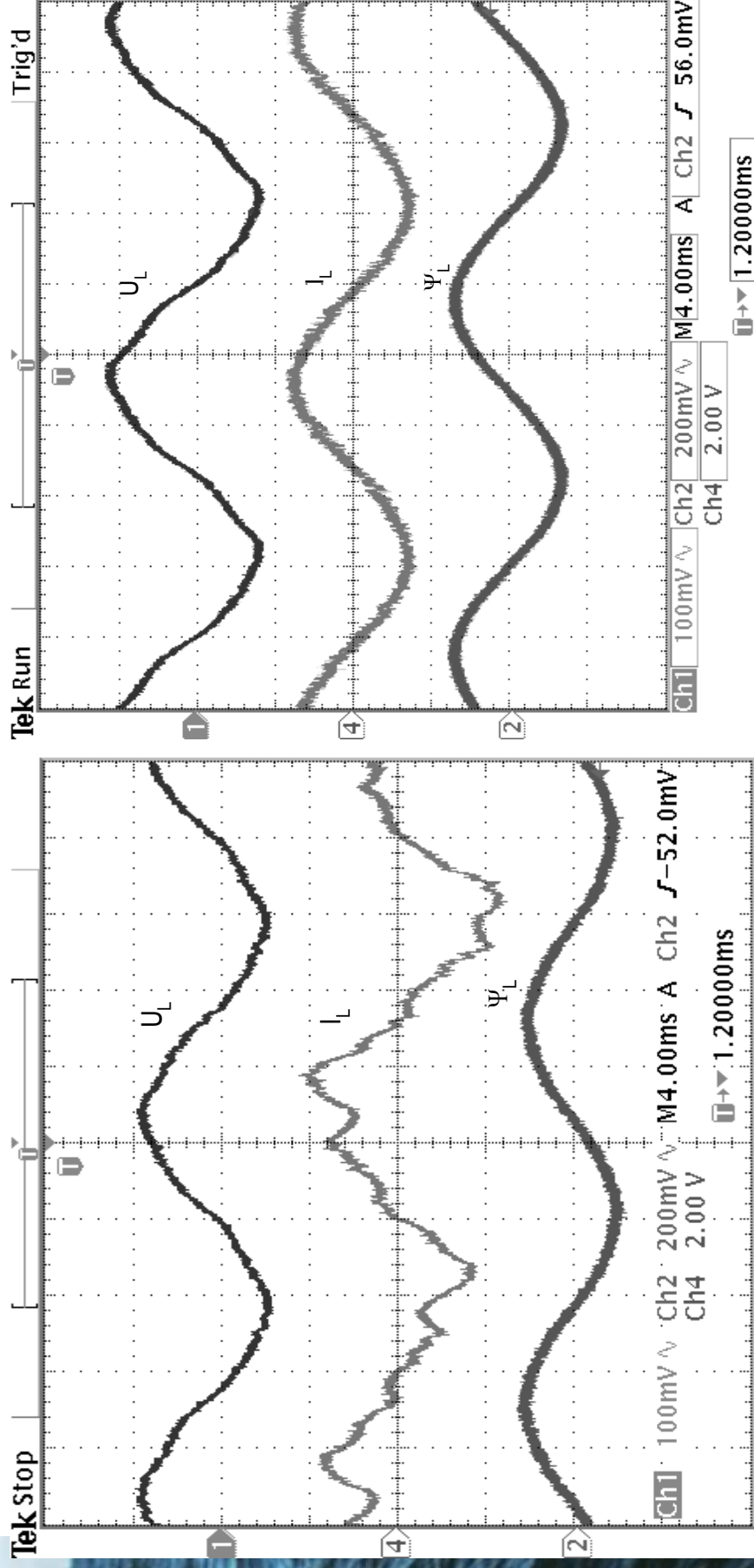




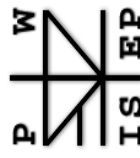
Transient of the step change of the load: (a) conventional DPC, (b) – proposed VF-DPC,.

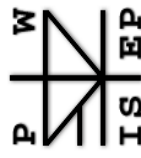
From the top: line voltage, estimated line voltage, line currents, instantaneous active and reactive power.



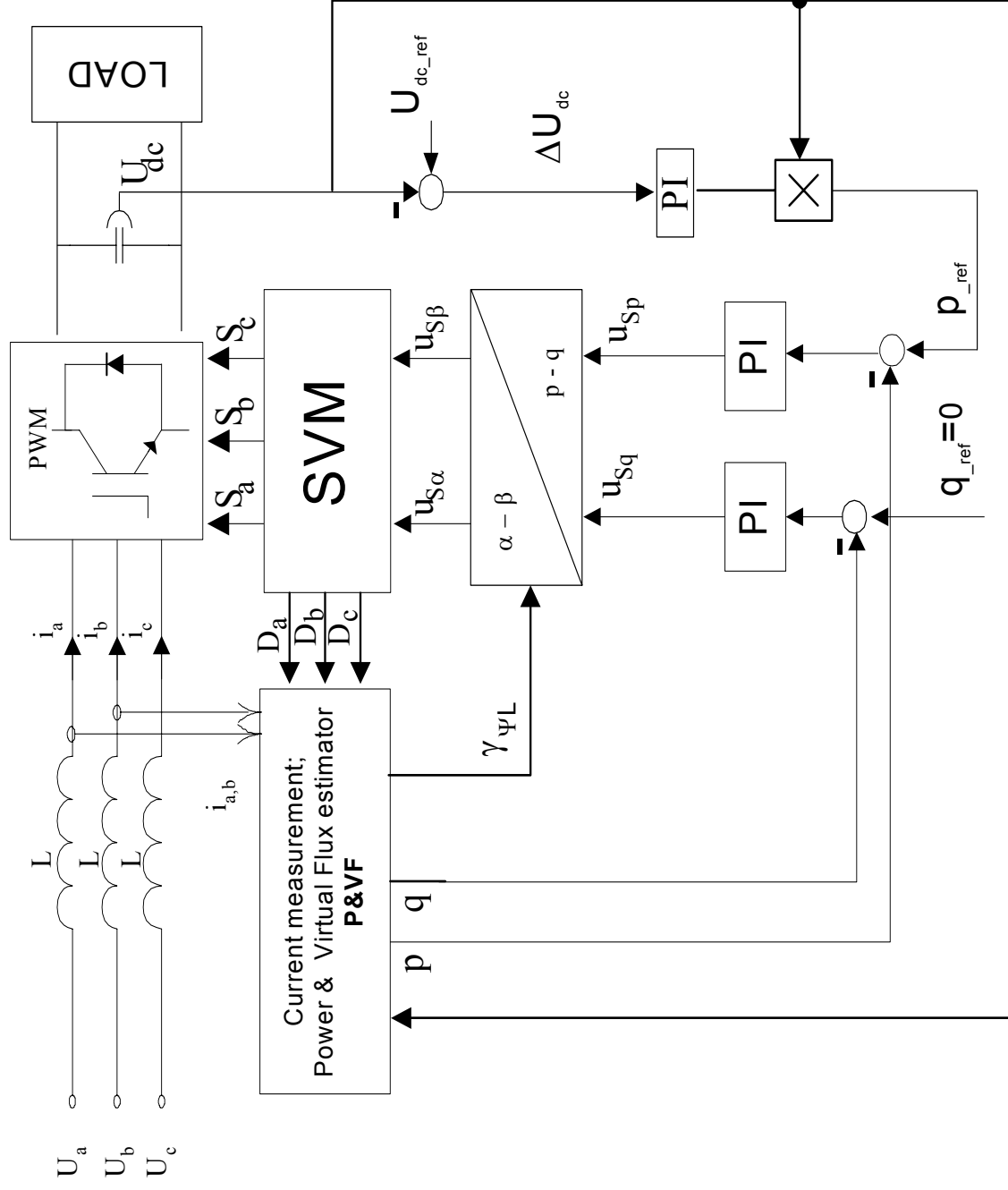


Experimental waveforms with distorted line voltage for conventional DPC (left) and VF-DPC (right).
From the top: line voltage, line currents (5A/div) and estimated virtual flux.



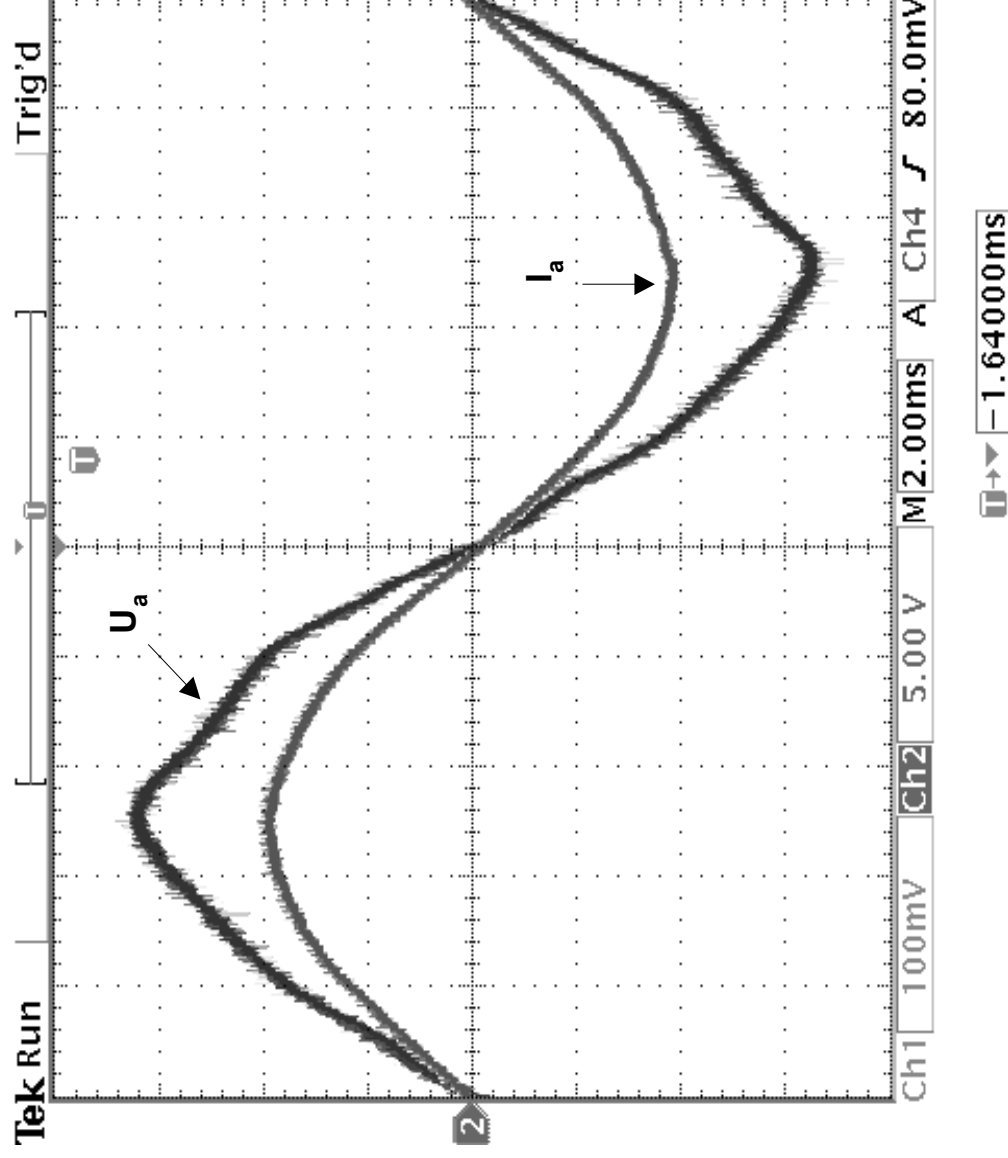


Block scheme of DPC using Space Vector Modulation (DPC-SVM)





Experimental results

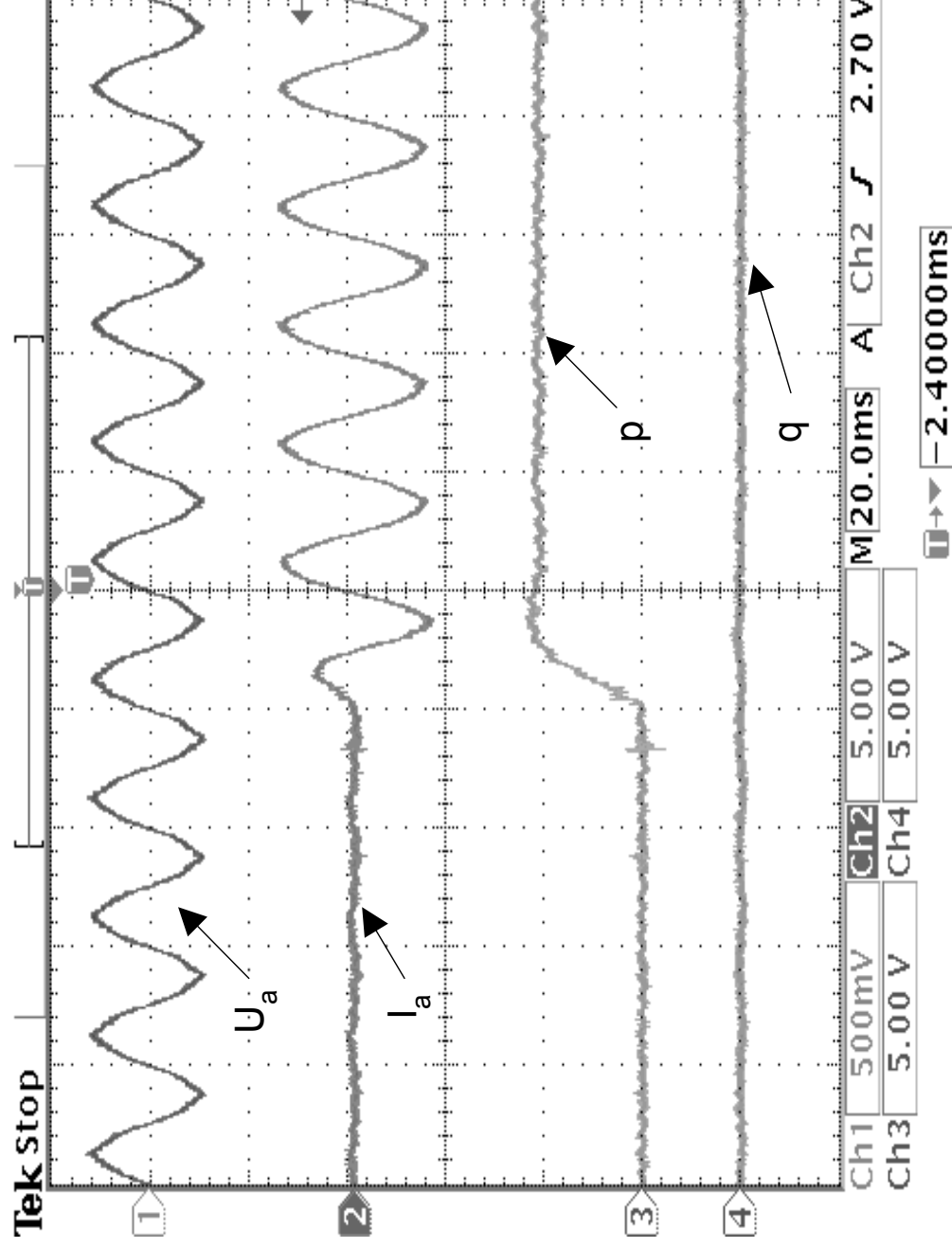


Experimental waveforms with distorted line voltage for DPC-SVM.

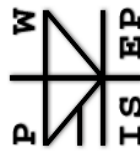
From the top: line voltage and line currents (10A/div)(THD of line current = 2,6%).



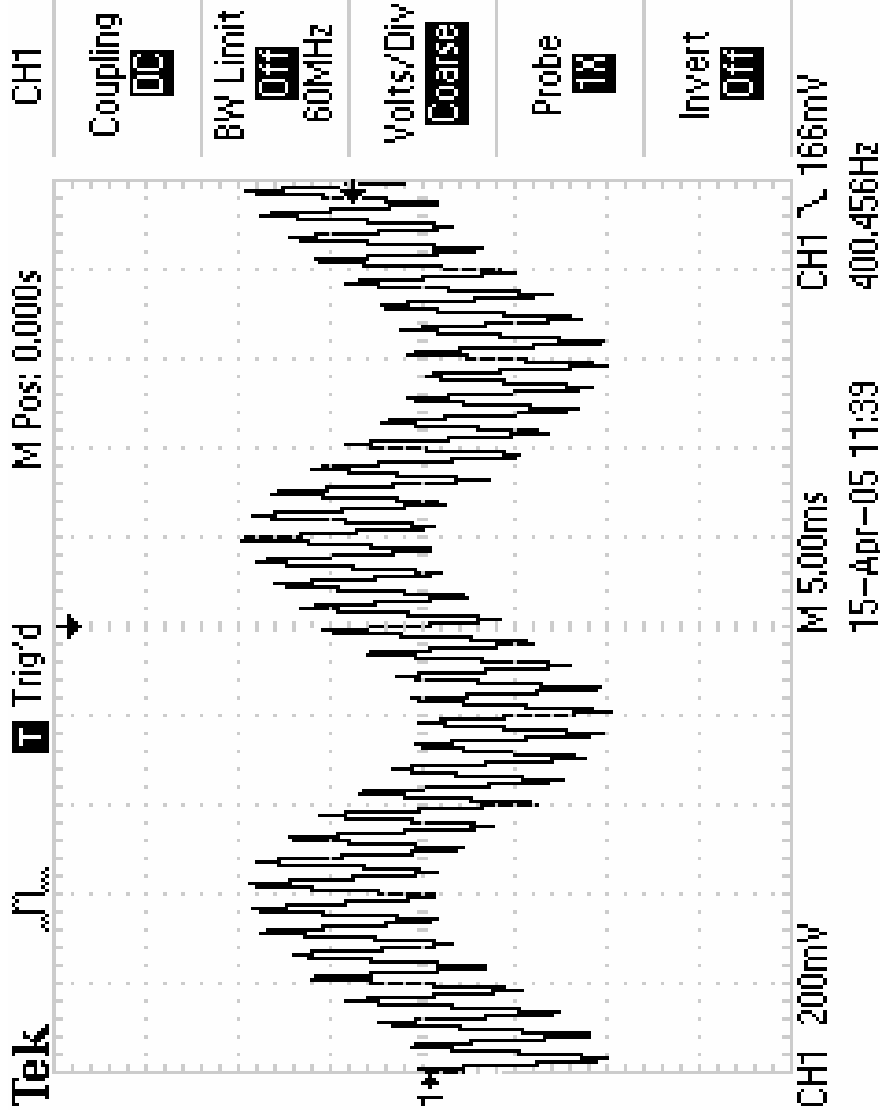
Experimental results



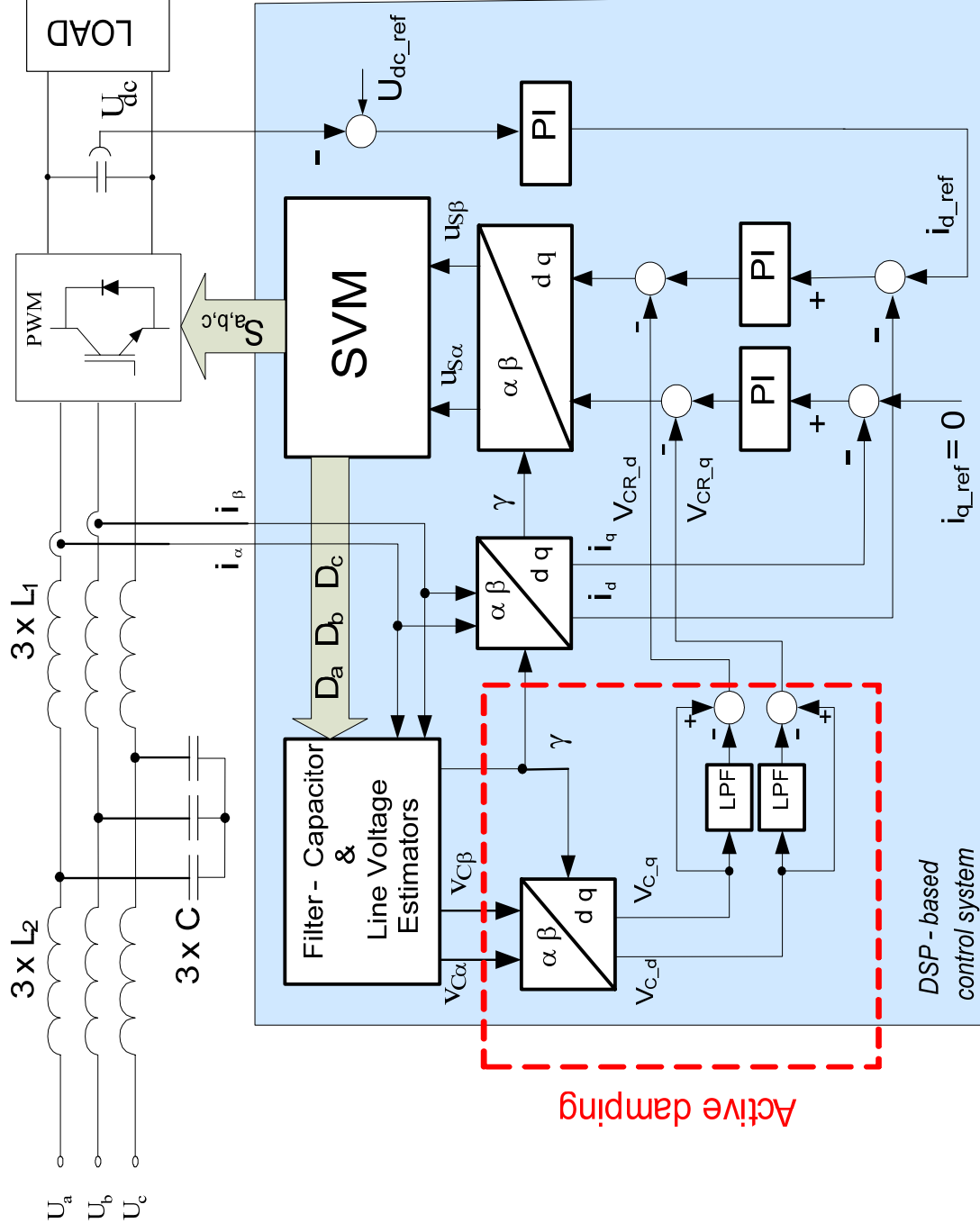
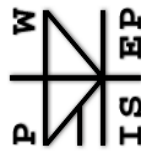
Transient of the step change of the load in the DPC-SVM: load increasing
 From the top: line voltages, line currents (10A/div), active and reactive power.



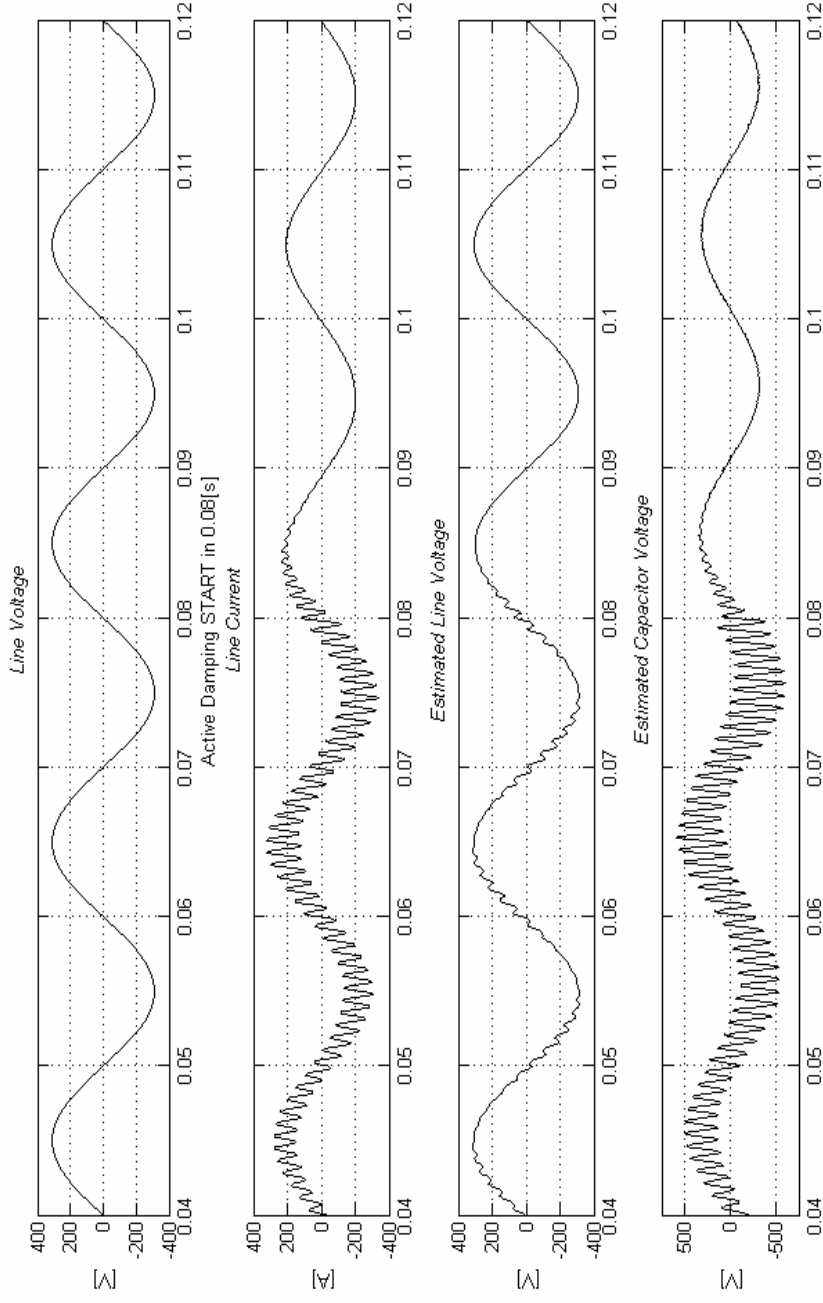
1. Introduction



Line current during undesired resonance effect (stability problem)
 with LCL filter

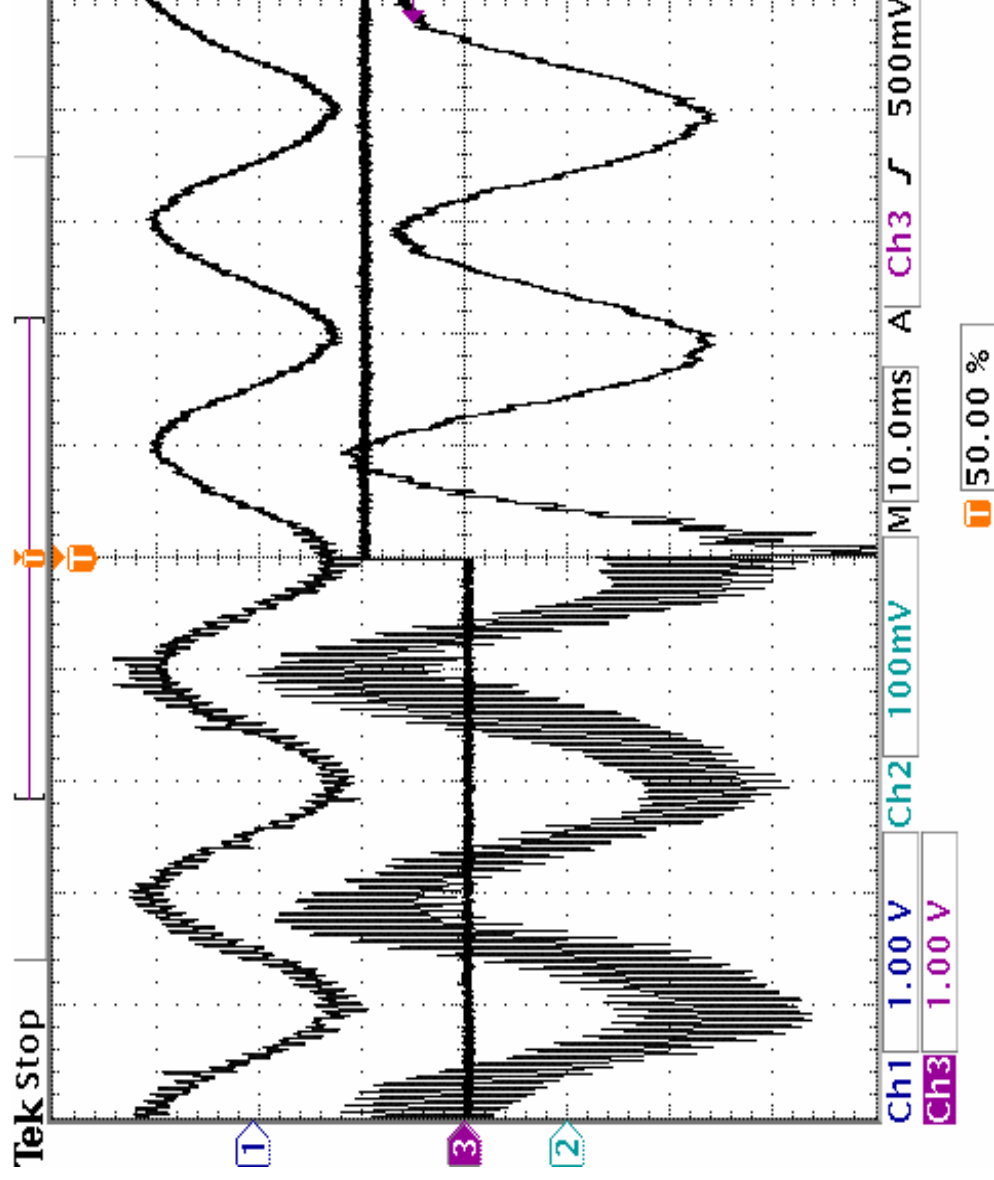


Basic scheme of VOC with active damping and voltage estimators

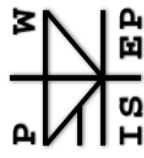


Sensorless VOC with AD based on high-pass filters. Simulated waveforms of line voltage u_{Line} , line current i_{L2} estimated line voltage u^*_{Line} and estimated capacitor voltage u^*_C , switch-on of active damping function in 0.08 [s].

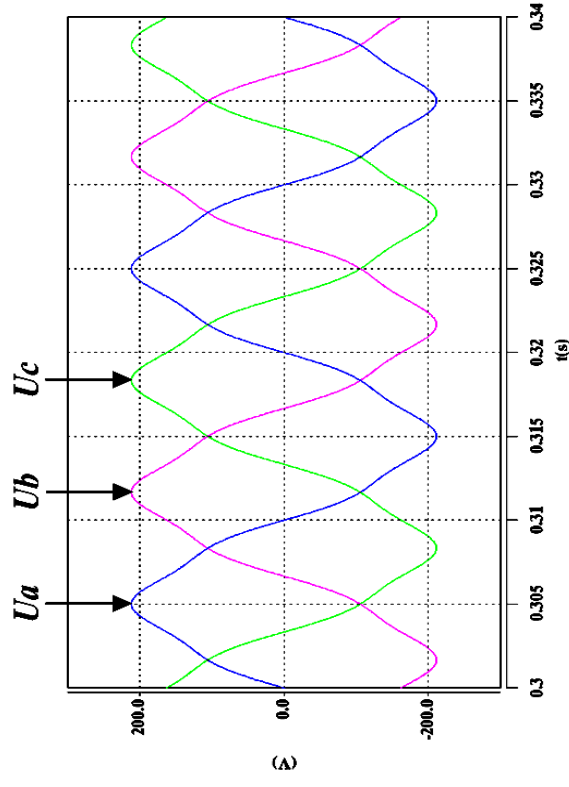




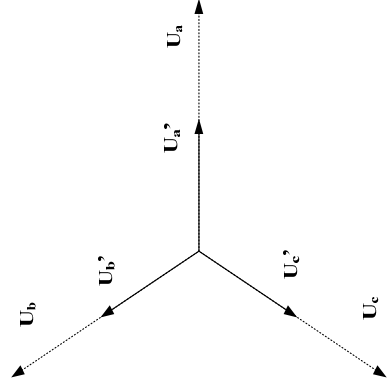
Sensorless VOC with AD based on high-pass filters. From the top: line voltage u_{Line} , signal showing when AD is activated, line current i_{L2} .



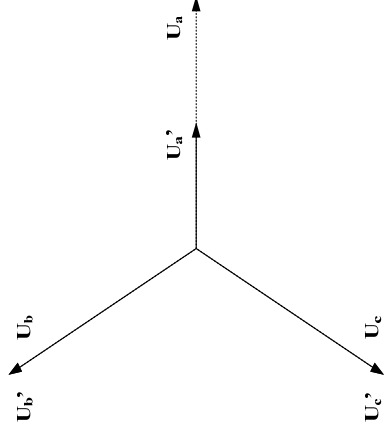
Zakłócenia występujące w sieci



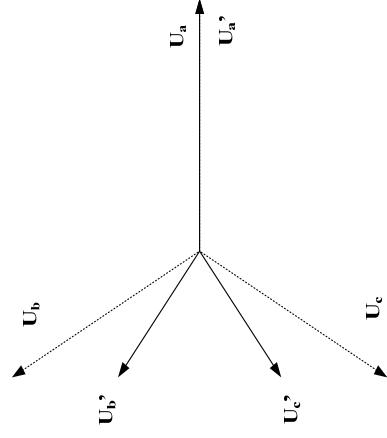
Type A



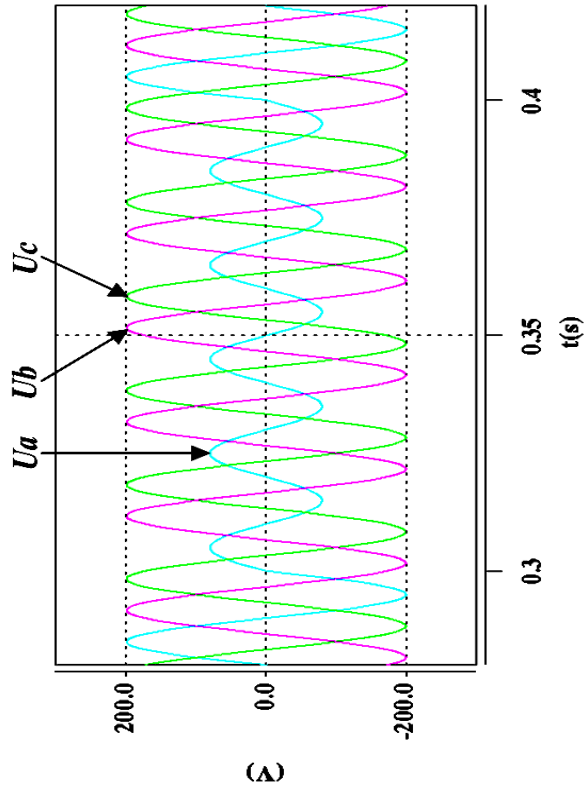
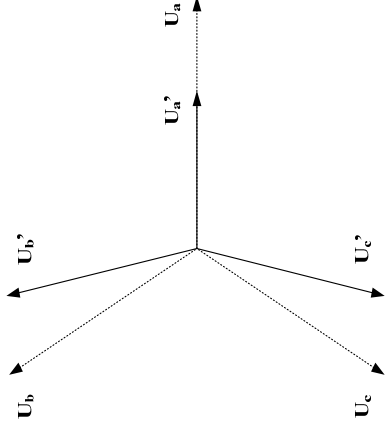
Type B



Type C

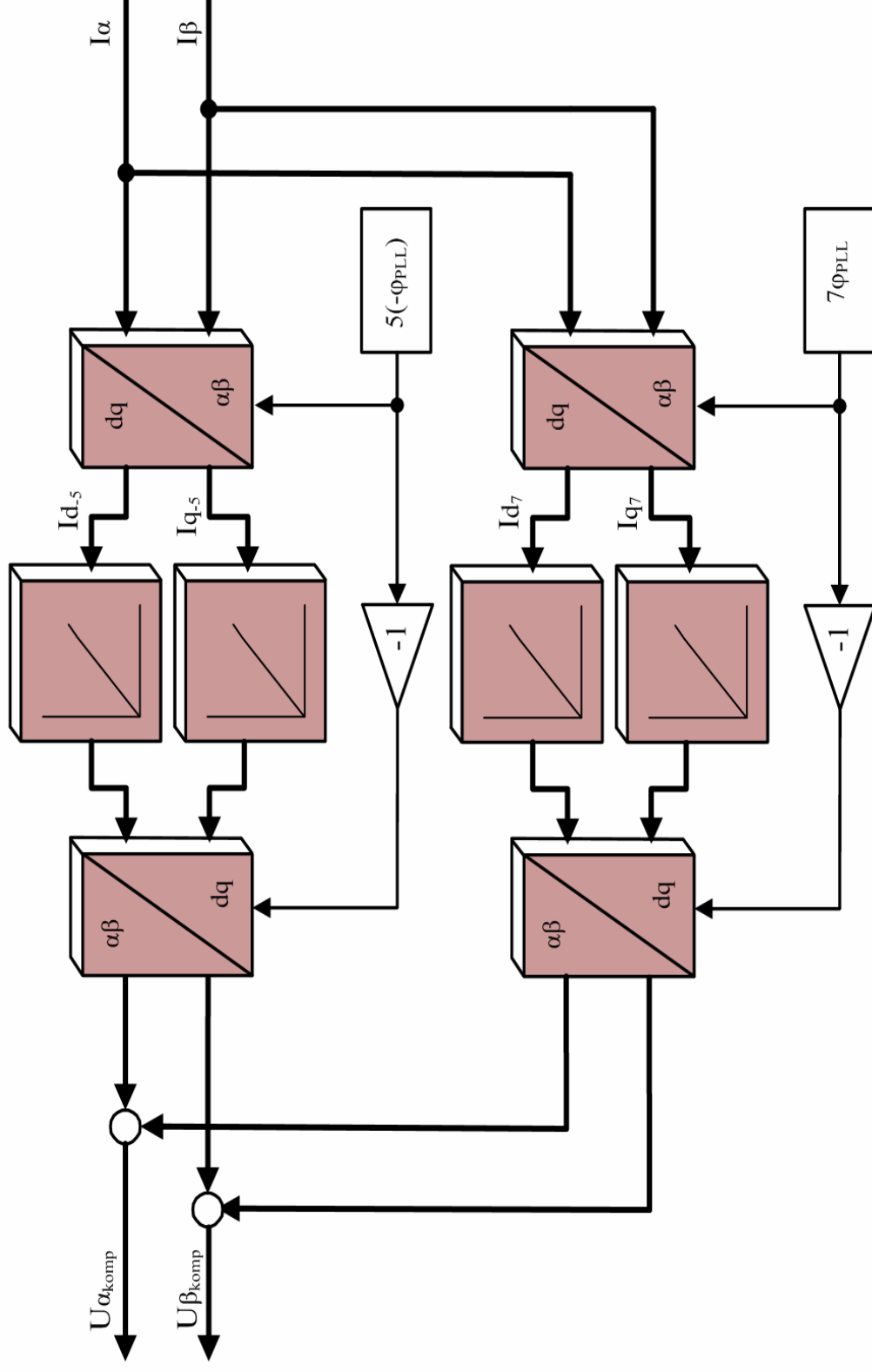


Type D





Algorytm kompensacji wyższych harmonicznych





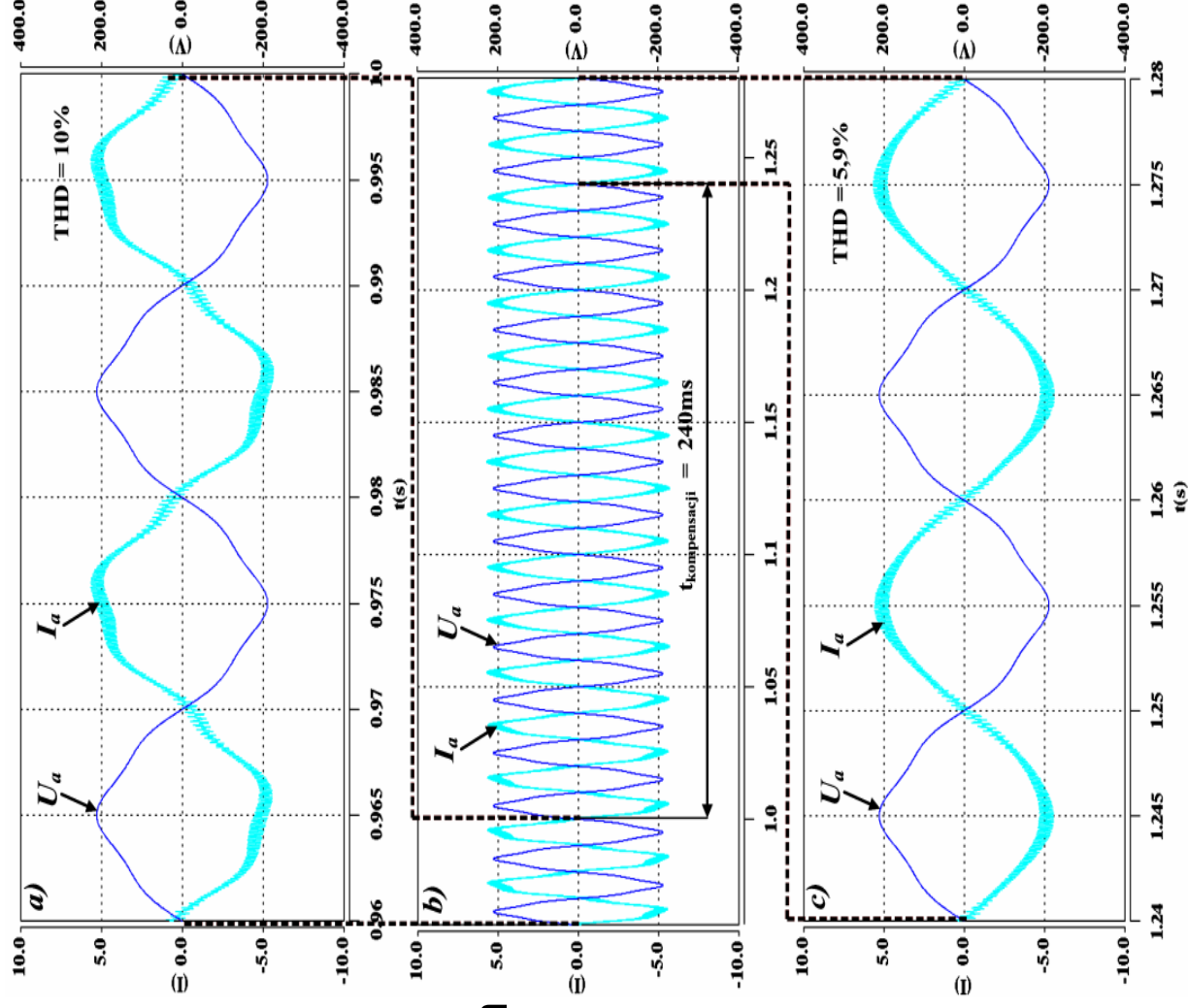
Wyniki Badań Eksperymentalnych

Algorytm kompensacji wyższych harmonicznych (od góry):

przebieg prądu przed załączeniem kompensacji

proces kompensacji

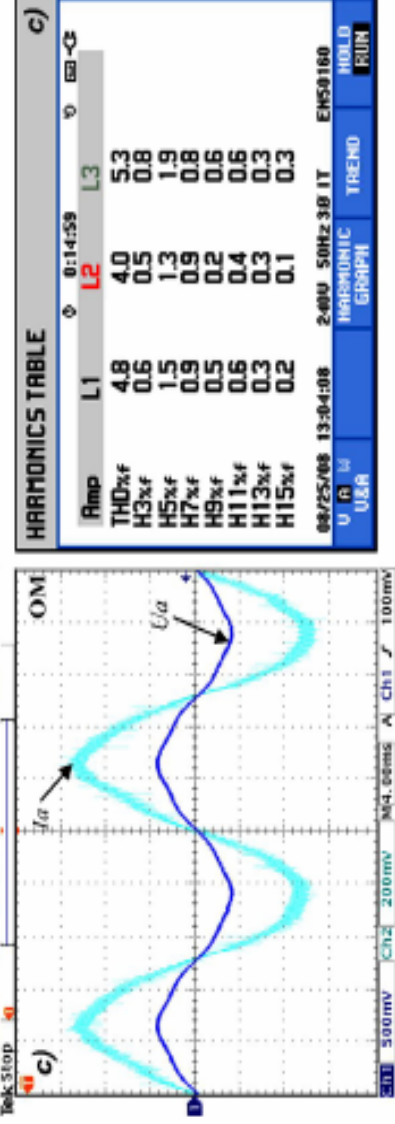
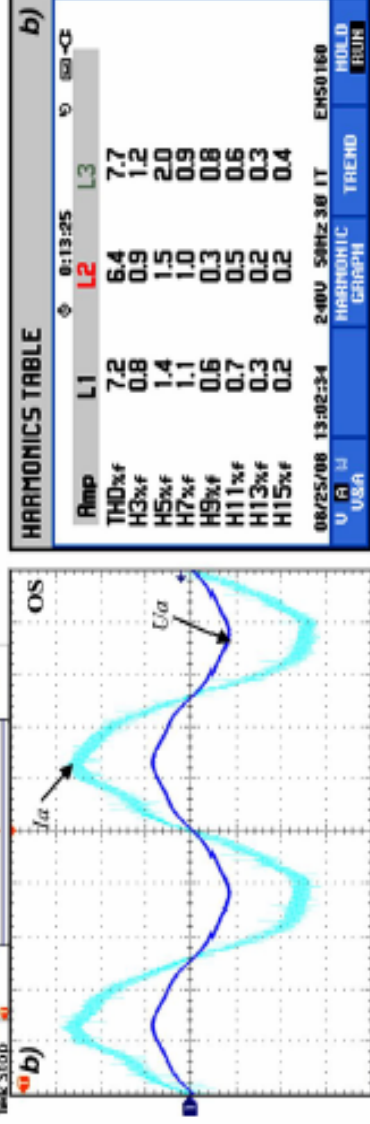
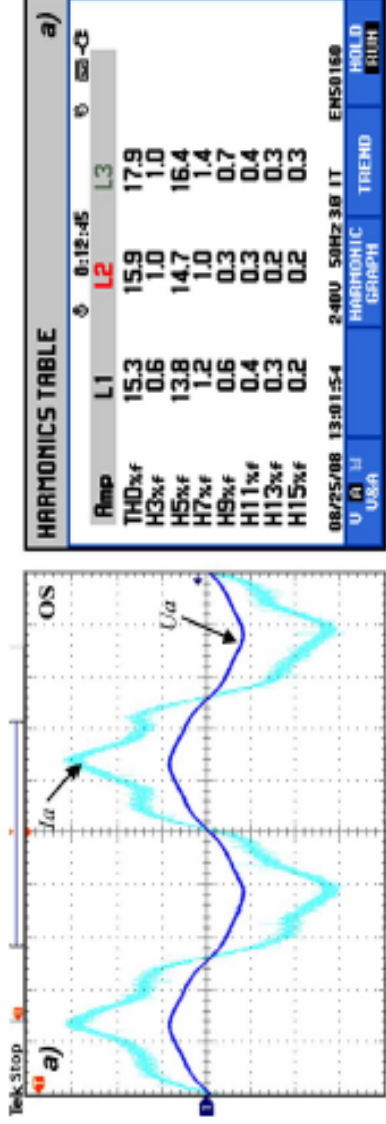
przebieg prądu po załączeniu kompensacji





Kompensacja wyższych harmonicznych

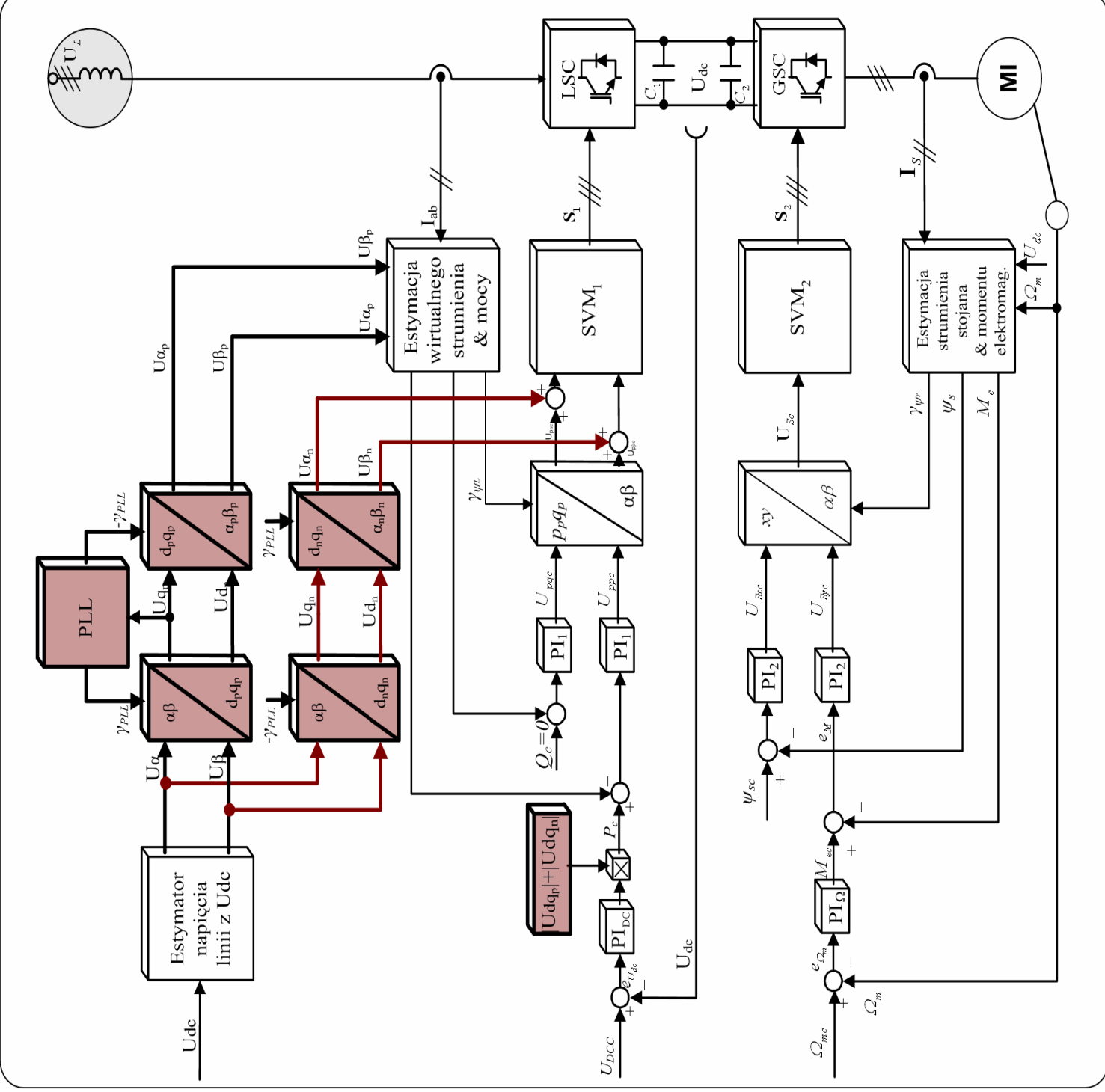
Prąd przy napięciu sieci z 6% zawartością piątej harmonicznej:



a) przy sterowaniu klasycznym

b) po załączeniu kompensacji (kryterium symetrii)

c) po załączeniu kompensacji (kryterium modułu)





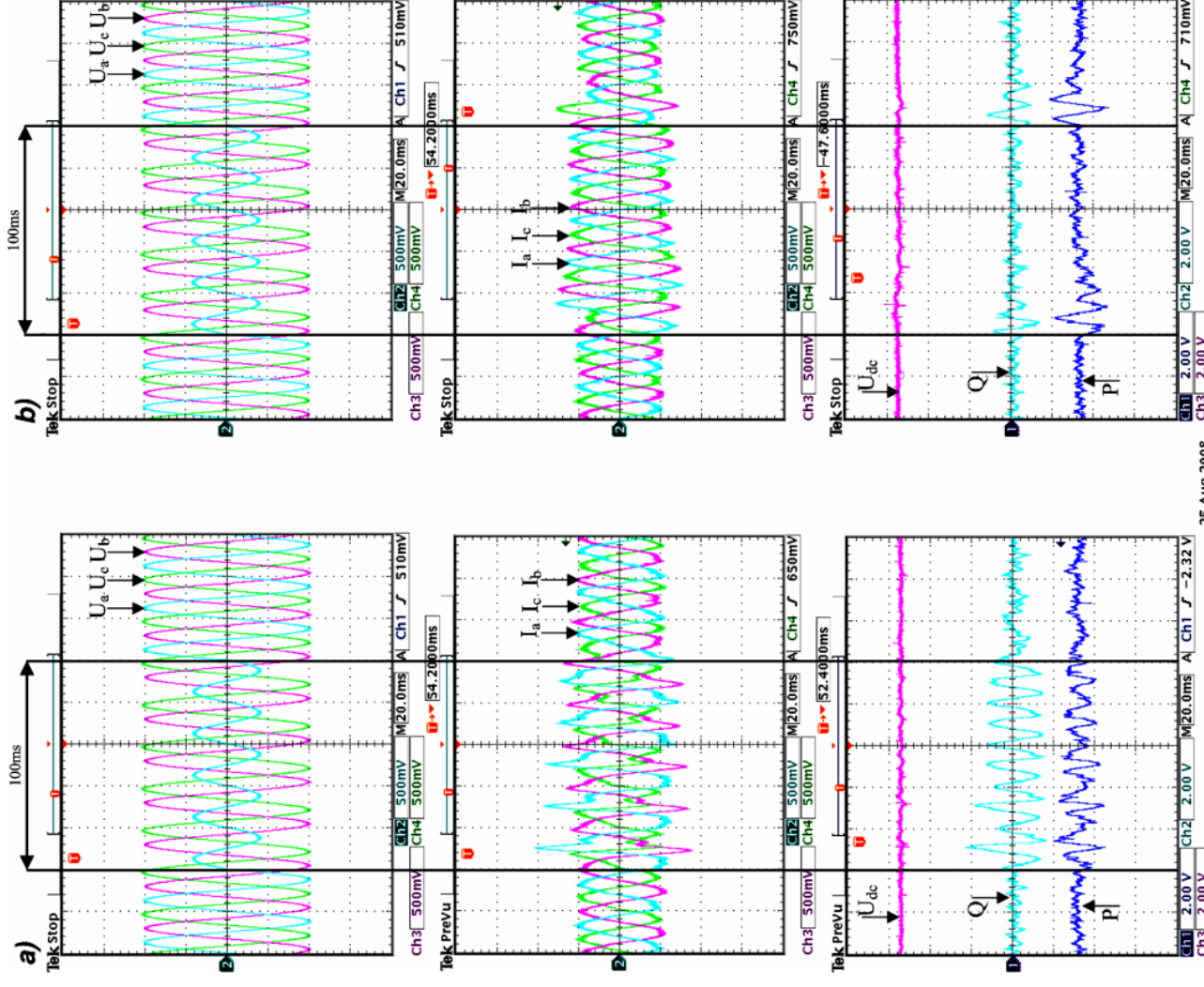
Kompensacja zapadów napięcia

Niezależne sterowanie składową zgodną i przeciwną prądu

Zapad napięcia w jednej fazie:

a) 60% dla sterowania klasycznego

b) 60% przy załączonej kompensacji



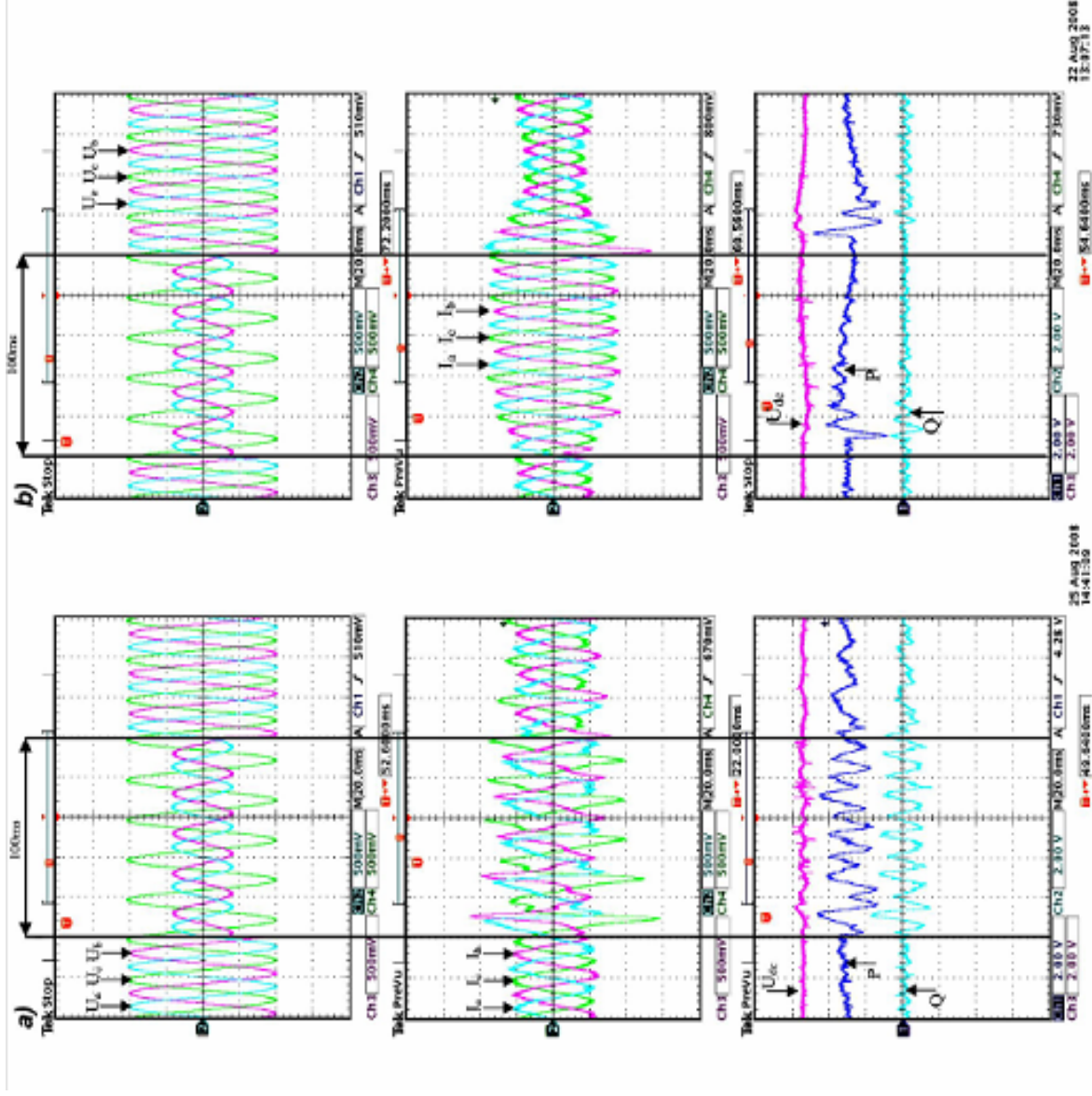


Kompensacja zapadów napięcia

Zapad napięcia 60% w dwóch fazach

a) 60% dla sterowania klasycznego

b) 60% przy załączonej kompensacji





Podsumowanie

- Dla prawidłowej i niezawodnej pracy przekształtnika sprzęgającego w warunkach zakłóceń występujących w sieci energetycznej wymagana jest istotna rozbudowa układu sterowania
- Dla małych zakłóceń zdawalające wyniki uzyskuje się stosując estymatory napięcia i mocy bazujące na koncepcji wirtualnego strumienia
- W przypadku silnych zakłóceń napięcia sieci: wysokie THD (>6%) oraz zapadów, konieczne jest wprowadzenie dodatkowych algorytmów kompensujących składowe zerową i przeciwną
- W ISEP PW prowadzone są prace w zakresie sterowania sprzęgów ergoelektronicznych OZE z siecią energetyczną
- Opracowany i opatentowany w ISEP układ sterowania VF-DPC-SVM zapewnia poprawną regulację mocy oraz aktywne tłumienie rezonansu filtra LCL bez czujników napięcia
- Przedstawione wyniki pokazują, że układy kompensacji pracują poprawnie, badania są kontynuowane.



Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering
Institute of Control & Industrial Electronics
Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, Tel:+48226280665, Fax:+48226256633



Dziękuję za uwagę!