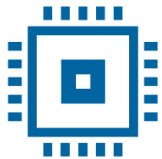


# Cercetări Privind Controlul Convertoarelor Electronice de Putere Pentru Integrarea Surselor Regenerabile de Energie și a Sistemelor de Stocare a Energiei în Microrețele Electrice

Conf.dr.ing. Ioan ȘERBAN



Universitatea  
Transilvania  
din Brașov

FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ  
ȘI ȘTIINȚA CALCULATOARELOR



# Conţinutul tezei de abilitare

- Rezultatul activităţii profesionale din ultimii 10 ani;
- Rezultate publicate în reviste internaţionale de prestigiu, cotate ISI-WOS cu factor de impact (FI) ridicat;
- Brevete de invenţie (propuse şi obţinute);
- Proiecte de cercetare în calitate de director;
- Recunoaşterea internaţională a activităţii ştiinţifice prin numeroase citări atrase de publicaţiile autorului;
- Soluţii tehnice cu potenţial ridicat de dezvoltare ulterioară.





## ■ Realizări științifice și profesionale:

- Capitolul 1. Invertor monofazat în punte H cu circuit minimalist de decuplare a puterii oscilante
- Capitolul 2. Reglajul frecvenței în microrețele cu surse regenerabile de energie prin intermediul sistemelor de stocare a energiei
- Capitolul 3. Strategii de control pentru microrețele funcționând insularizat și conectate la rețea
- Capitolul 4. Controlul sarcinilor active pentru îmbunătățirea calității energiei în microrețele cu surse regenerabile de energie

## ■ Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei





# Cap. 1. Invertor monofazat în punte H cu circuit minimalist de decuplare a puterii oscilante

- Soluții active de decuplare – tranzistoare suplimentare;
- Soluția propusă de autor nu necesită elemente semiconductoare suplimentare:

$$p(t) = \underbrace{S \cos \varphi}_P - \underbrace{S \cos(2\omega t - \varphi)}_{\tilde{p}}$$



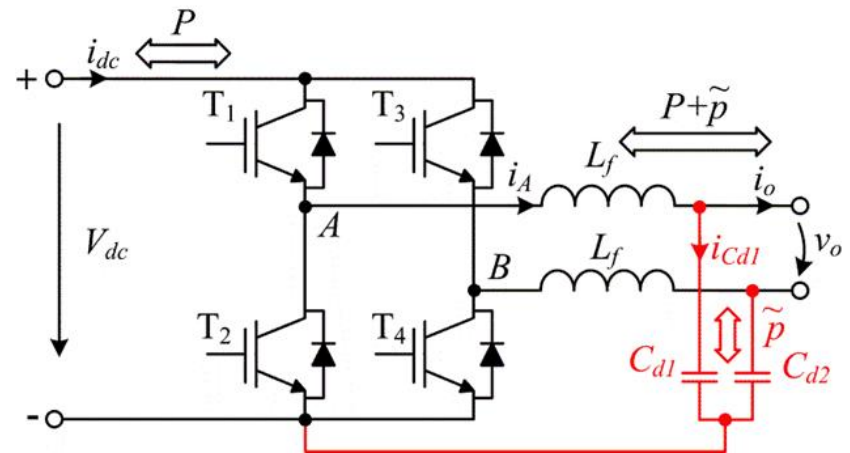
$$\tilde{p} = C_{d1} v_{cd1} \frac{dv_{cd1}}{dt} + C_{d2} v_{cd2} \frac{dv_{cd2}}{dt}$$



$$v_{cd1,2} = \underbrace{\pm \frac{\sqrt{2}V_o}{2} \sin(\omega t)}_{\text{Comp. diferențială}} + \underbrace{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2S}{\omega C_d} \sin(2\omega t - \varphi) - 2V_o^2 \sin^2(\omega t) + 4V_{c0}^2 + \frac{2S}{\omega C_d} \sin(\varphi)}}_{\text{Comp. mod comun (} v_{comp} \text{)}}$$

Comp. diferențială

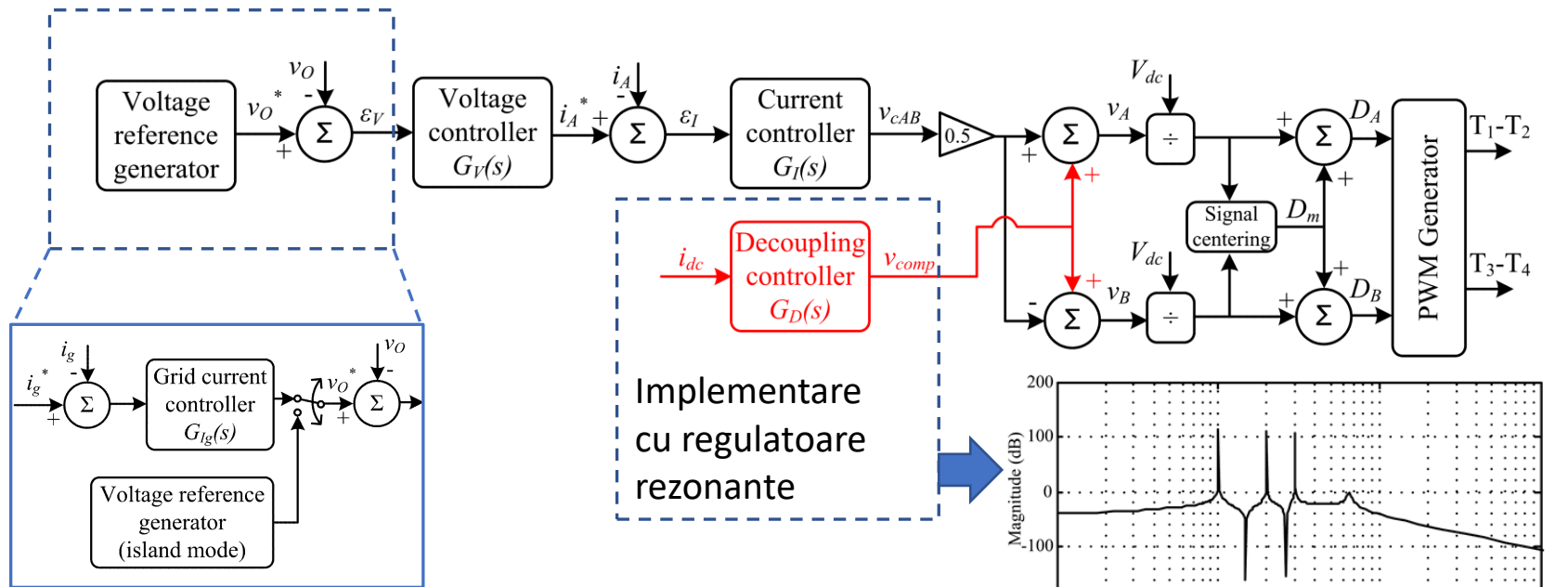
Comp. mod comun ( $v_{comp}$ )



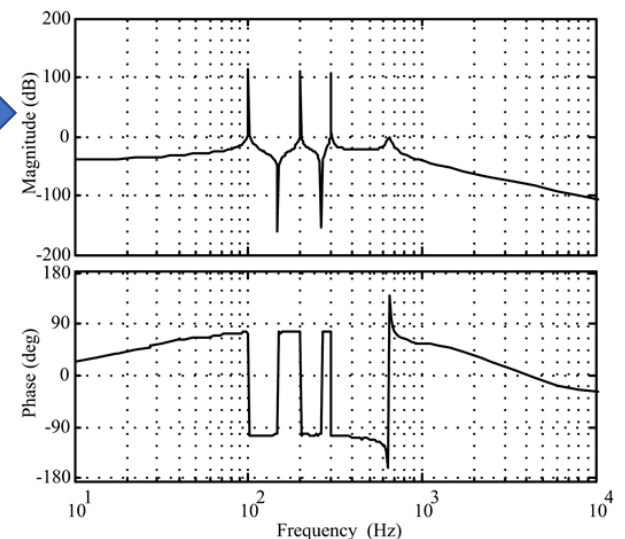


# Schema de control a invertorului propus

- La schema de reglare a invertorului clasic se adaugă o buclă de control a curentului pulsatoriu de pe linia de c.c.



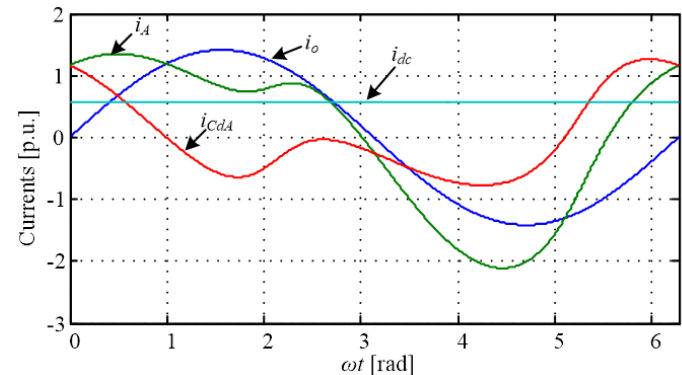
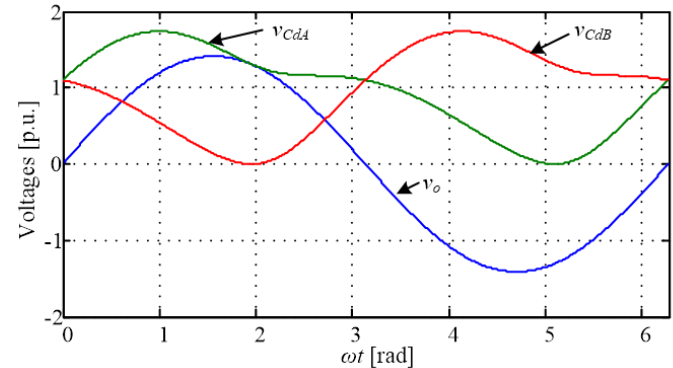
Varianta de funcţionare pe reţea şi insularizat





# Încărcarea inverterului

- Dimensionarea  $C_{d1,2}$  implică un compromis între încărcarea în tensiune și în curent a inverterului.
- Criteriul de optimizare: pierderi minime prin inverter.
- La sarcină inductivă curentul prin inverter devine mai mic decât în cazul clasic (fără circuit de decuplare).



$S=1$ u.r., $\cos(\varphi)=1$ , $C_{d1,2}=1$ u.r.	Inverterul clasic	Inverterul propus
$V_{dc-min}$ [u.r.]	1.41	1.74
$I_{A(rms)}$ [u.r.]	1	1.19



# Validarea experimentală

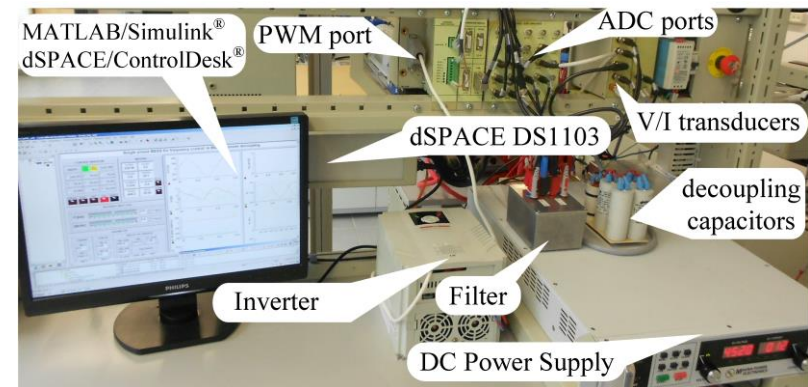
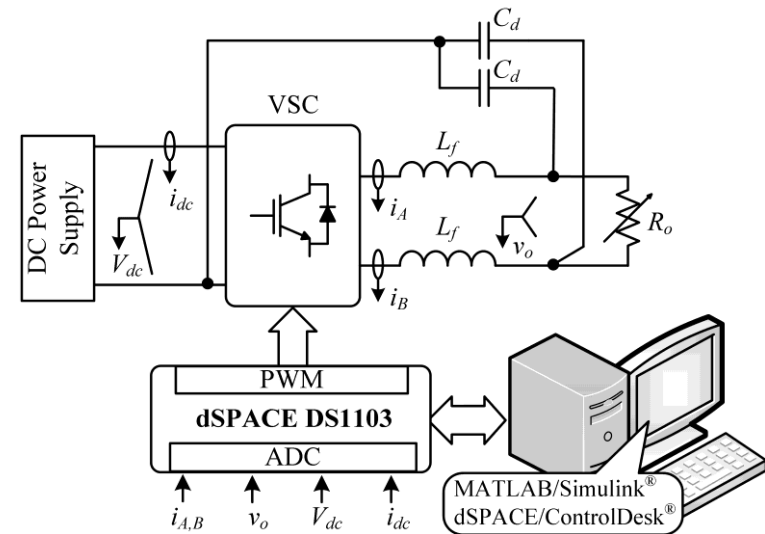
■ Schema de control a inverterului implementată în sistem dSPACE DS1103;

■ Implementare inverter :

■ IGBT (varianta 1);

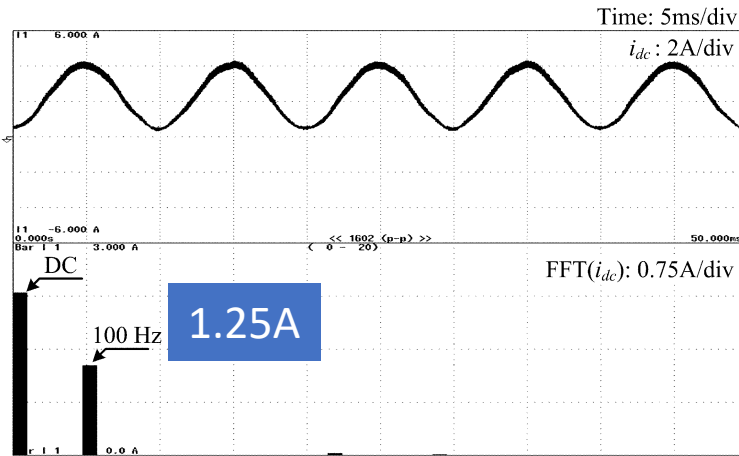
■ SiC-MOSFET (varianta a 2-a).

Parametru	Simbol	Valoare
Puterea activă nominală de ieşire (pe sarcină)	$P_o$	1 kW
Tensiunea şi frecvenţa de ieşire	$V_o, f_o$	230V; 50Hz
Frecvenţa de comutaţie PWM	$f_s$	20kHz
Tensiunea de c.c.	$V_{dc}$	450V
Inductanţele de filtrare	$2xL_f$	$2x1mH$
Capacitatea condensatoarelor de decuplare	$C_{d1}, C_{d2}$	$60 \mu F$

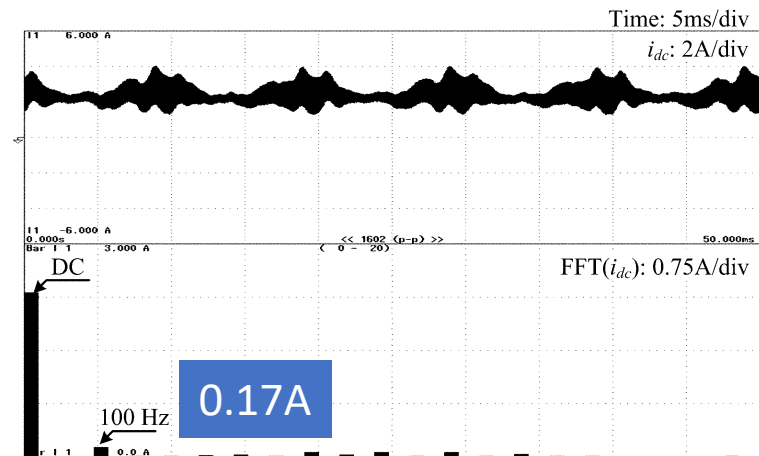




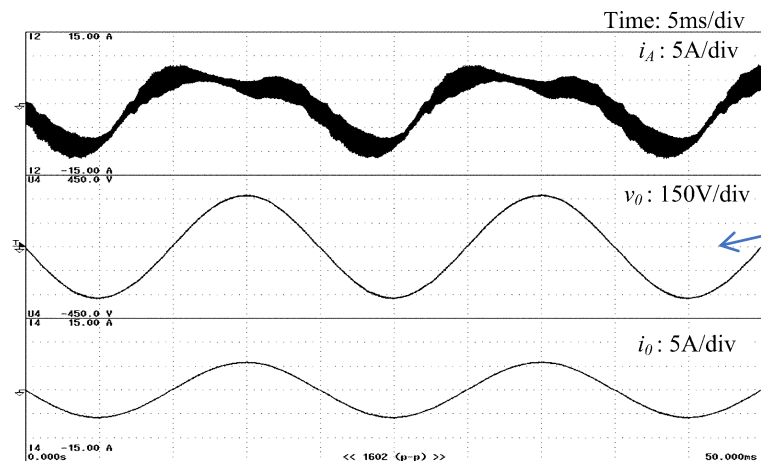
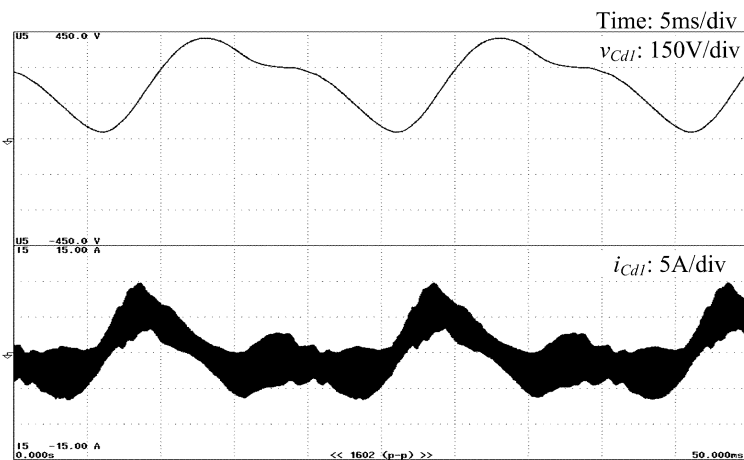
# Rezultate experimentale



Invertor clasic – fără circ. decuplare



Invertor propus – cu circ. decuplare



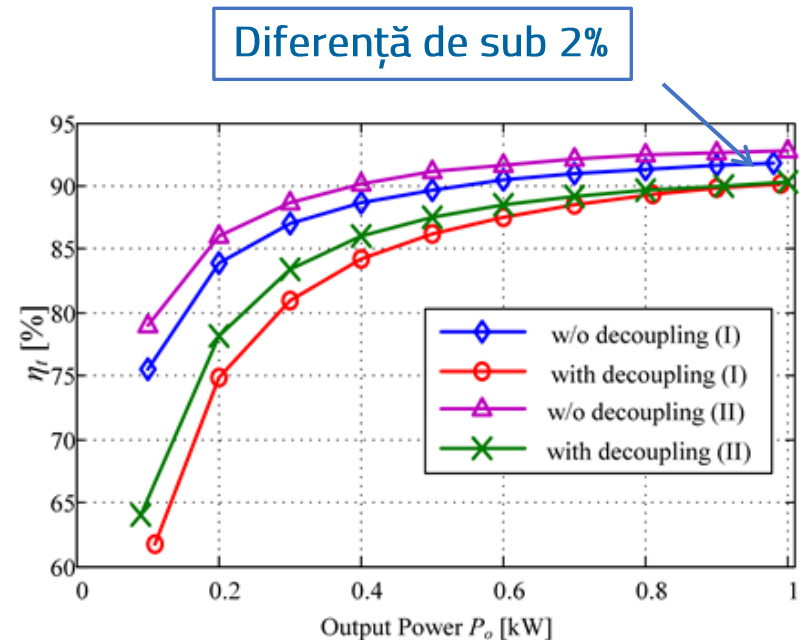




# Analiza randamentului – tranzistoare Si

- Randamentul invertorului scade odată cu introducerea circuitului de decuplare;
- Toate soluțiile active cu elemente semiconductoare suplimentare înregistrează scăderi ale randamentelor în jur de 2%.
- Pierderi la  $P_o=1\text{kW}$ :

Element	Pierderi [W]
Punte H	87.4
Inductanțe de filtrare ( $2 \times L_f$ )	16.1
Condensatoare de decuplare ( $C_{d1}, C_{d2}$ )	2.1
Total	105.6



(I) cu tensiune de alimentare constantă ( $V_{dc}=450\text{V}$ );

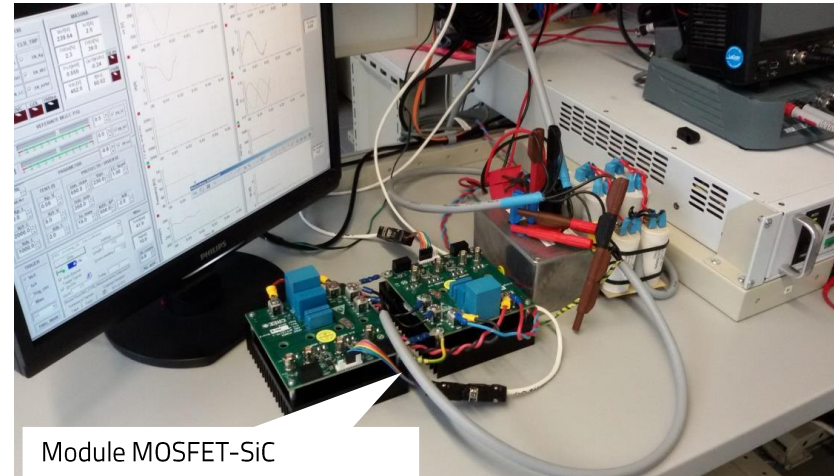
(II) cu tensiune de alimentare variabilă în funcție de încărcarea invertorului, menținând factorul de modulație în amplitudine la o valoare optimă de 0.95.



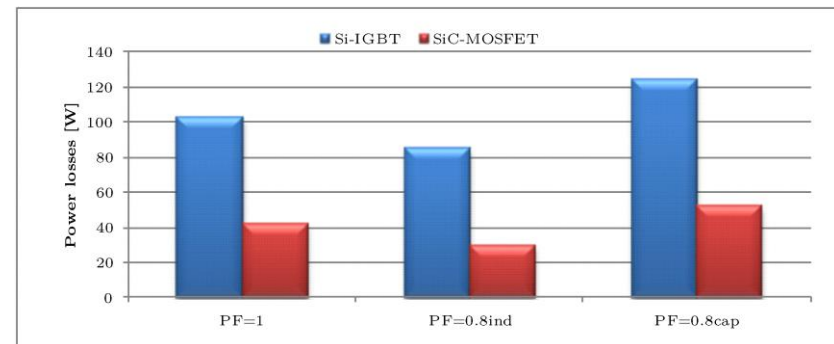


# Analiza randamentului – tranzistoare SiC

- În varianta cu MOSFET-SiC performanţele inverterului propus cresc considerabil;
- Necesitând doar cele 4 tranzistoare ale punţii H, costul utilizării tehnologiei SiC este mai mic decât în cazul altor soluţii active de decuplare ce necesită tranzistoare suplimentare.



Module MOSFET-SiC



	Inverterul propus $\eta_1$ [%]		Inverterul convenţional $\eta_0$ [%]		Diferenţa $\eta_1 - \eta_0$ [%]	
	Si-IGBT	SiC-MOSFET	Si-IGBT	SiC-MOSFET	Si-IGBT	SiC-MOSFET
<b>PF=1</b>	90.6%	96.0%	92.0%	97.2%	-1.4%	-1.2%
<b>PF=0.8 ind.</b>	90.3%	96.4%	90.4%	96.6%	-0.1%	-0.2%
<b>PF=0.8 cap.</b>	86.6%	93.9%	90.0%	96.9%	-3.4%	-3.0%



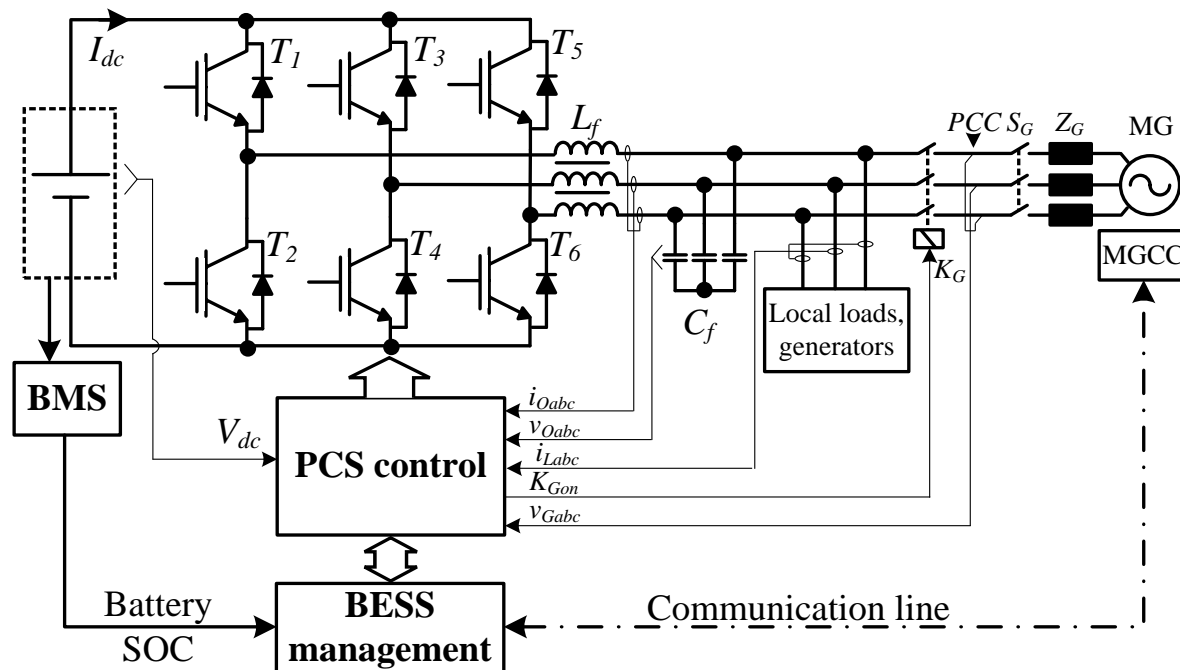
## Sinteză realizări - Cap. 1

- Invertor propus inițial de autor în cadrul conferinței IECON 2013 [1] – prezentare premiată în cadrul sesiunii;
  - Variantă detaliată a soluției publicată în 2015 în revista ISI de mare prestigiu *IEEE Trans. Industrial Electronics* [2];
  - Cerere de brevet OSIM [3], cu potențial de extindere internațională;
  - Numeroase articole publicate ulterior la nivel internațional pe ideea propusă de autor (peste 90 de citări pentru [1] și [2] - GoogleScholar).
  - Planuri de dezvoltare în viitor:
    - Implementarea unui sistem tip *resort electric* pe baza invertorului;
    - Prototip optimizat de invertor pentru centrale PV multi-string;
    - Adaptarea soluției la invertoare trifazate cu sarcini dezechilibrate.
1. I. Serban, "A novel transistor-less power decoupling solution for single-phase inverters," IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, 2013.
  2. I. Serban, "Power Decoupling Method for Single-Phase H-Bridge Inverters With No Additional Power Electronics," în IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. FI=7.05. 81 citări GoogleScholar.
  3. I. Serban, „Circuit și metodă de decuplare a puterii oscilante pentru invertoare monofazate”,  
propunere brevet OSIM, nr. RO130090/A0, cerere A/00611/11.08.2014.



# Cap. 2 Reglajul frecvenţei în microreţele cu surse regenerabile de energie prin intermediul sistemelor de stocare a energiei

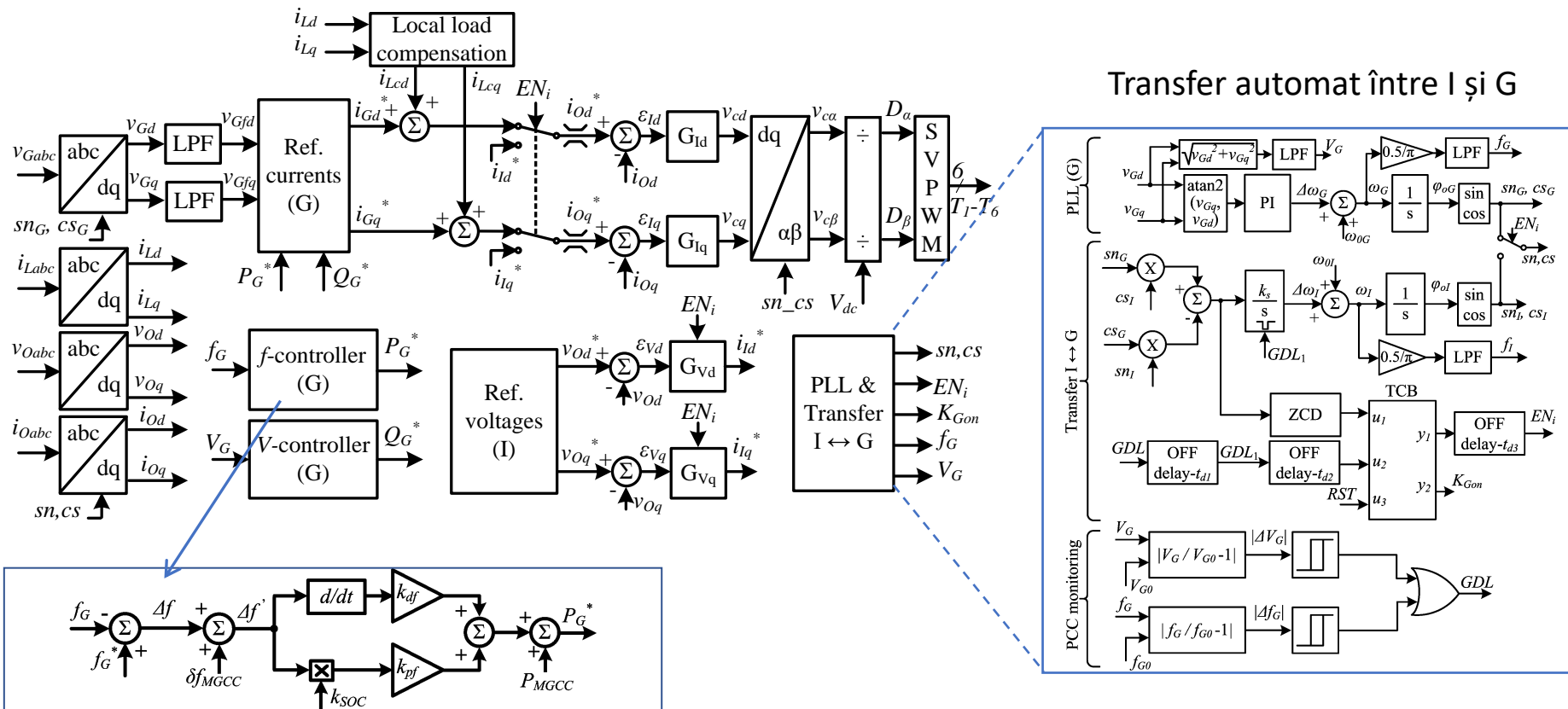
- Strategie de control a invertoarelor trifazate destinate integrării în microreţele autonome a sistemelor de stocare, pentru participarea la reglarea frecvenţei sistemului;





# Schema de control

- Schemă de control integrată ce asigură mai multe funcții specifice microrețelelor;



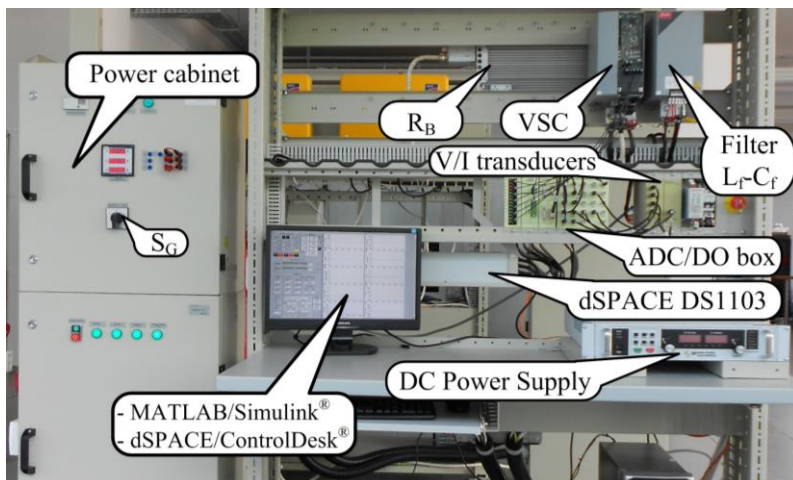
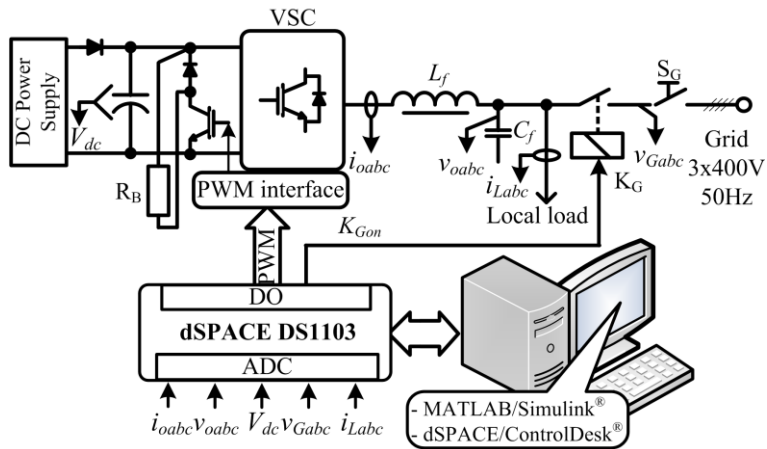
Notă: I – insularizat; G – conectat la rețea



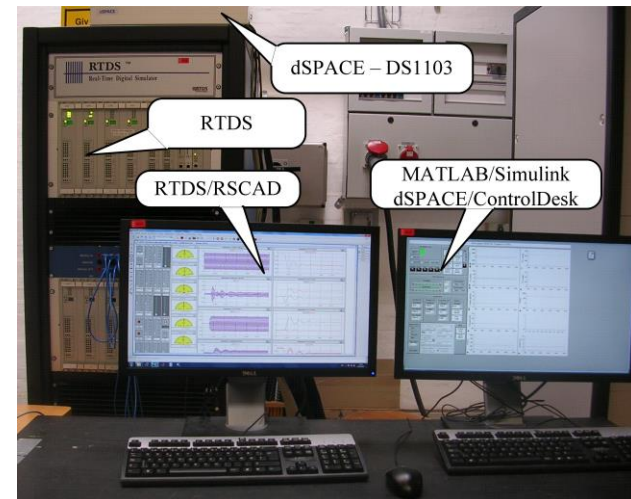
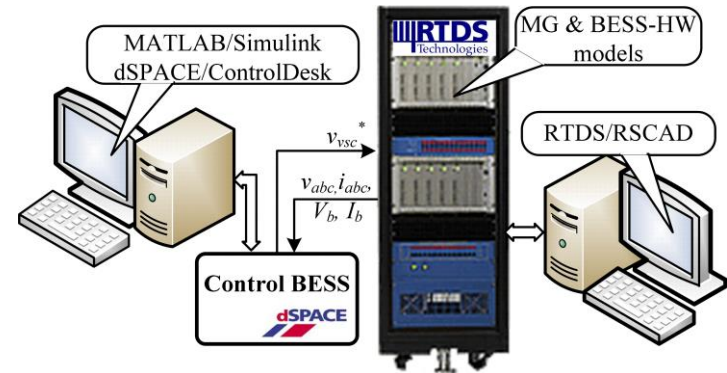


# Validări experimentale

## ■ Sistem 1 – ICDT-L04



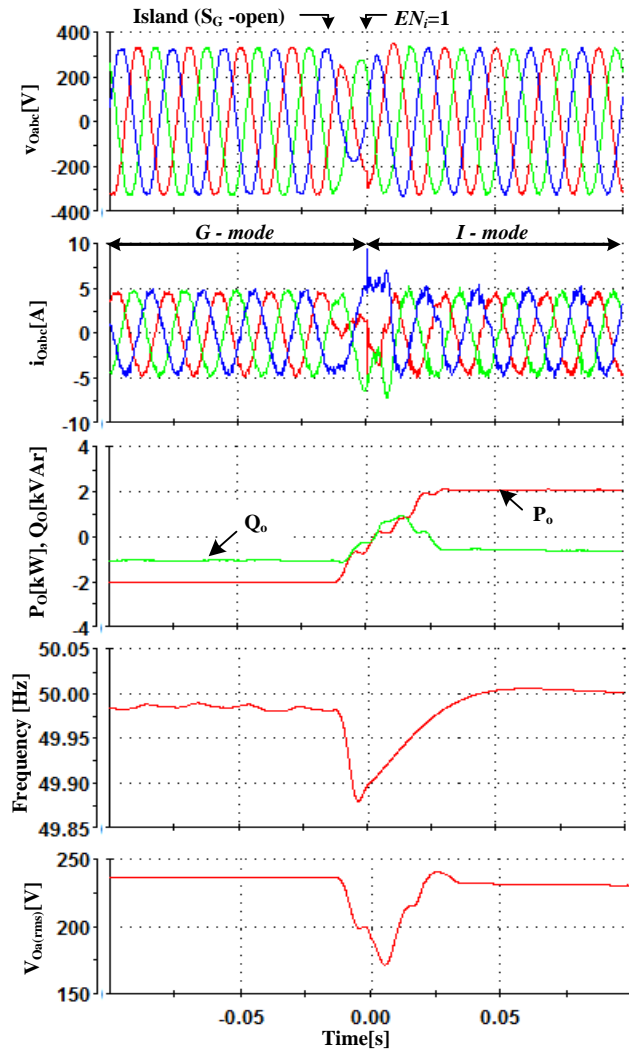
## ■ Sistem 2 – Universitatea Aalborg



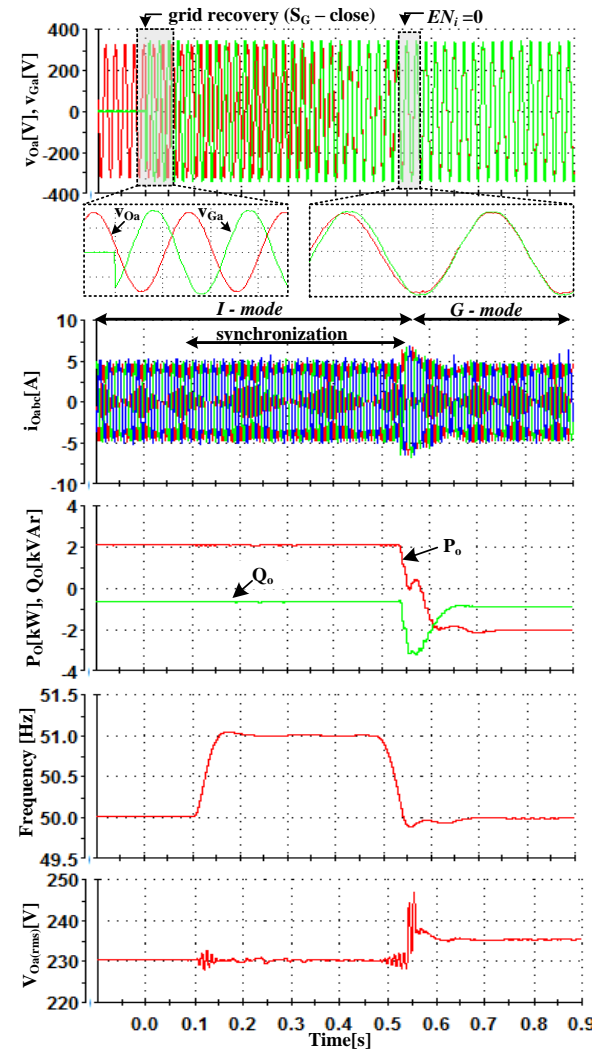


# Rezultate experimentale - 1

## Transfer din mod G în mod I:



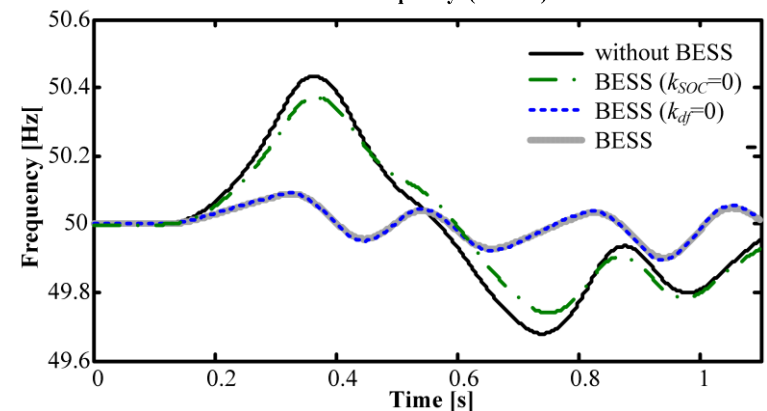
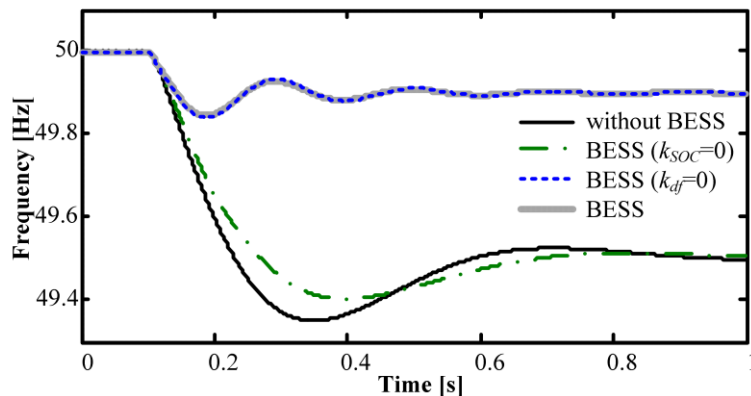
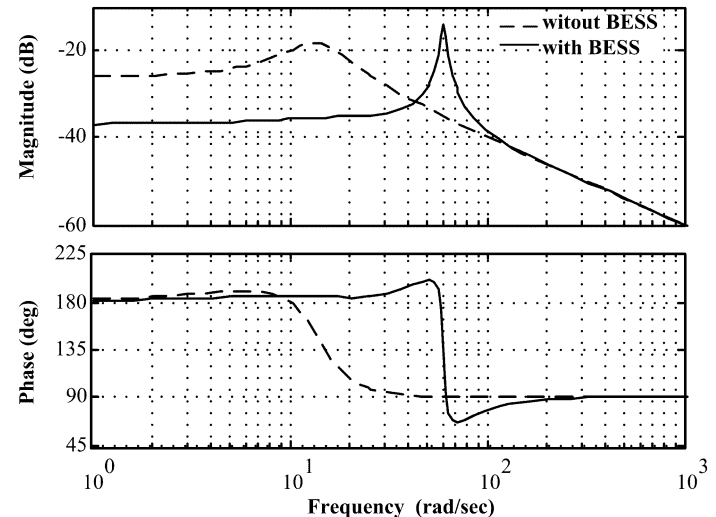
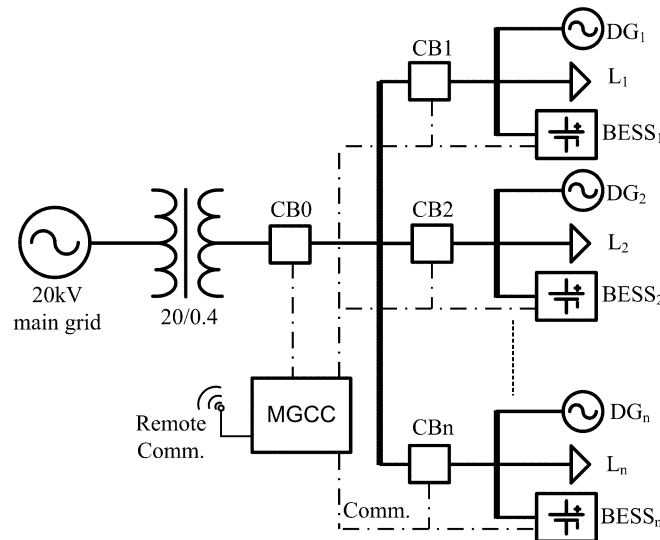
## Transfer din mod I în mod G:





# Rezultate experimentale - 2

- Utilizarea sistemelor de stocare a energiei pentru reglajul frecvenței în microrețele;
- Studiu efectuat în 2011 la Universitatea Aalborg, Danemarca.



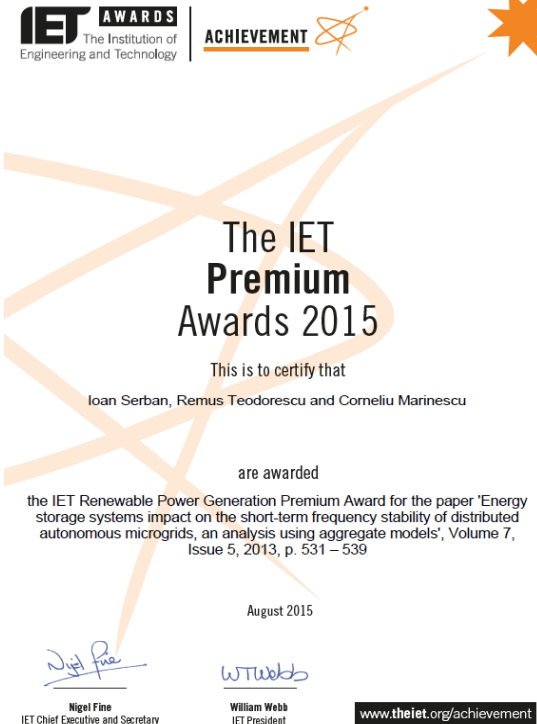




## Sinteză realizări - Cap. 2

- S-au dezvoltat mai multe variante, rezultatele fiind publicate în reviste ISI-WOS de prestigiu [1]-[3]:
  - *IEEE Transactions on Power Electronics* [1] – peste 140 citări GoogleScholar
  - *IET Renewable Power Generation* [2] – articol premiat în 2015 cu *IET Award for Best Paper in IET Renewable Power Generation*.
  - *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* – încadrat în lista ScienceDirect Top 25 cele mai descărcate articole IJEPES, Oct-Dec 2013.

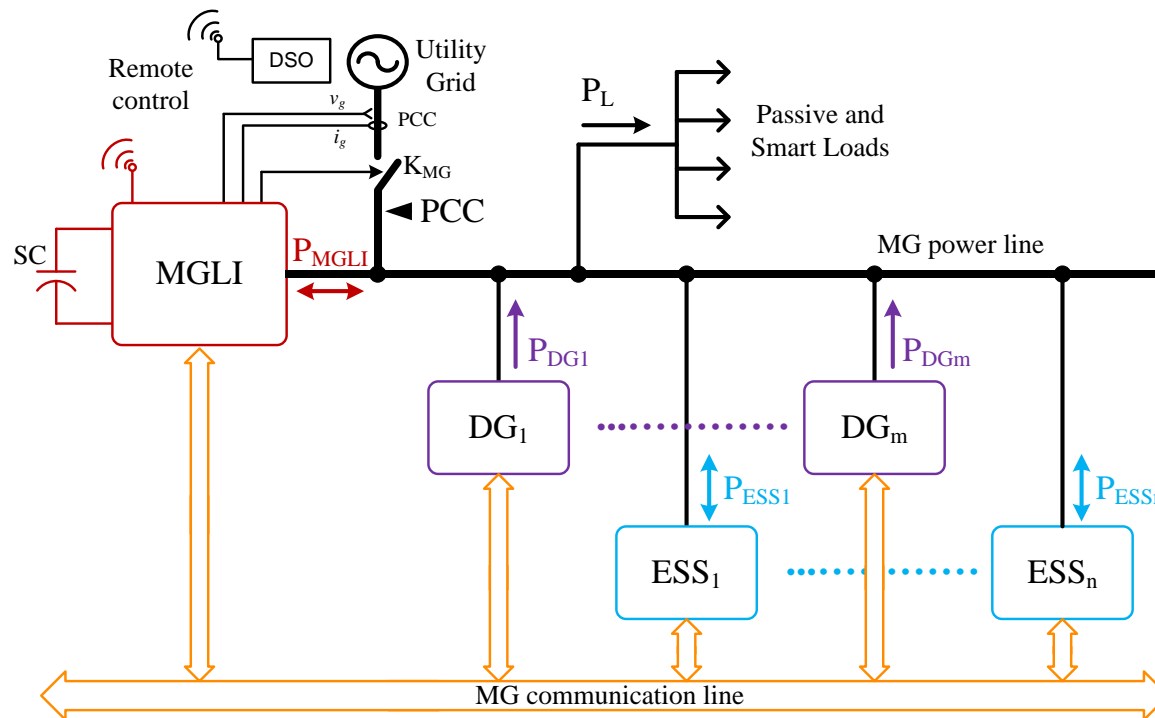
1. **I. Serban**, C. Marinescu, "Control Strategy of Three-Phase Battery Energy Storage Systems for Frequency Support în Microgrids and with Uninterrupted Supply of Local Loads", *IEEE Trans. on Power Electron*, 2014. FI=6.81.
2. **I. Serban**, R. Teodorescu and C. Marinescu, "Energy storage systems impact on the short-term frequency stability of distributed autonomous microgrids, an analysis using aggregate models," *IET Renewable Power Generation*, 2013. FI=3.48.
3. **I. Serban**, C. Marinescu, „Battery energy storage system for frequency support în microgrids and with enhanced control features for uninterruptible supply of local loads”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014. FI=3.61.





# Cap. 3. Strategii de control pentru microreţele funcţionând insularizat şi conectate la reţea

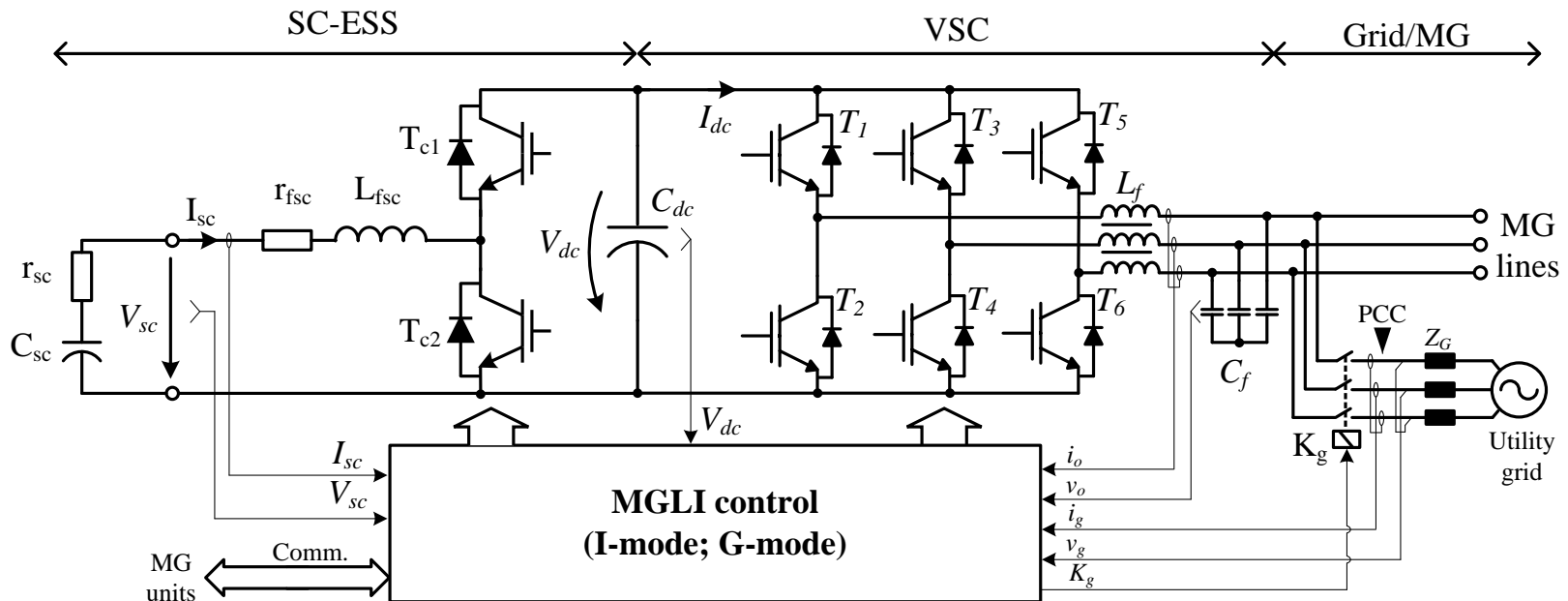
- S-au dezvoltat soluţii de control pentru microreţele insularizare şi conectate la reţea;
- Ceretare efectuată în cadrul unui proiect *Tinere Echipe* 2015-2017 – în calitate de director.





# Invertor coordonator de microreţea

- Invertor trifazat ce asigură coordonarea microreţelei
- Preia doar sarcina tranzitorie – stocare cu supercondensator – soluţie ce asigură permanent o rezervă de putere în microreţea
- În regim insularizat -> formator de tensiune
- În funcţionarea pe reţea – controlul transferului de putere prin PCC
- Asigură transferul automat între cele două regimuri

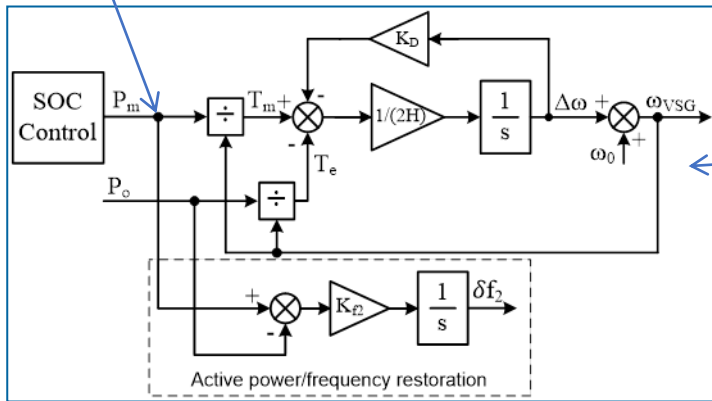




# Schema de control inverter coordonator

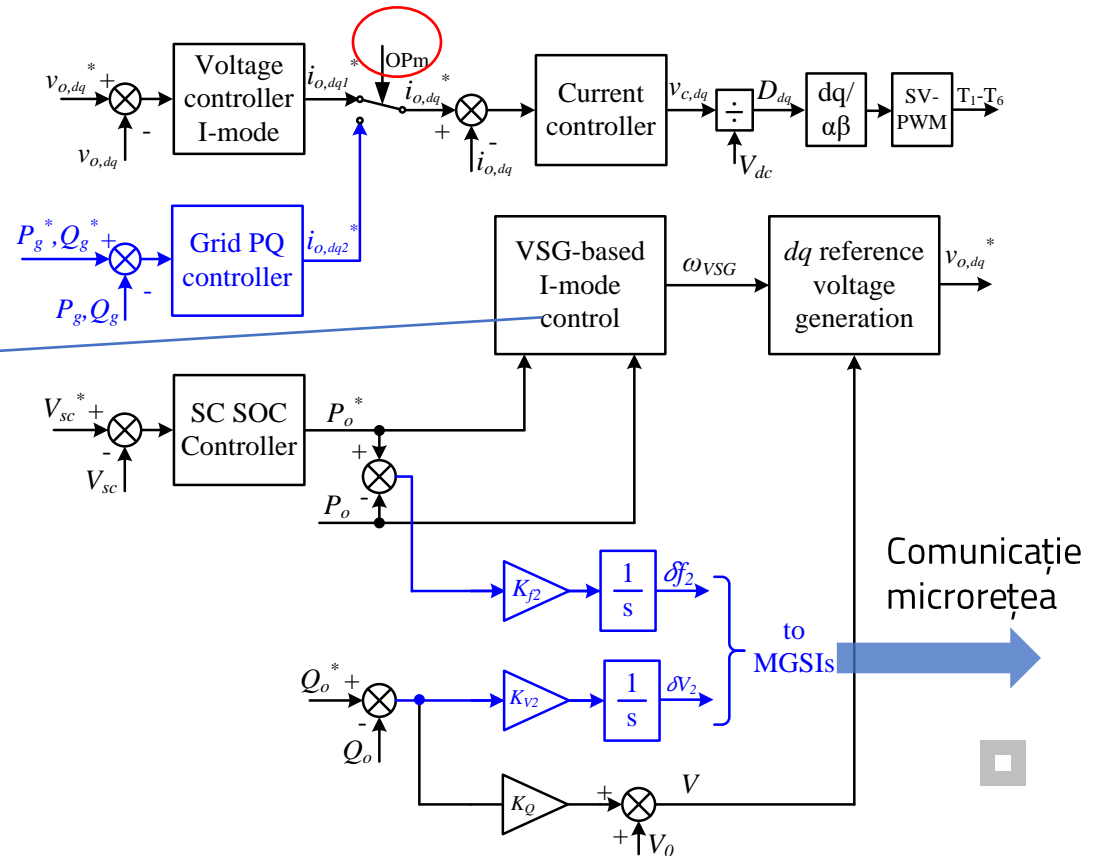
- În regim insularizat: generator sincron virtual – răspuns inerţial
- Conectat la reţea: regulator de putere activă şi reactivă prin PCC
- Transferul dintre cele două regimuri se face cu modificări minime în microreţea (semnalele de comunicaţie nu se modifică) – principal avantaj.

Putere mecanică virtuală – control SC



Emulare răspuns inerţial generator sincron

$$T_m - T_e = 2H \frac{d\omega_{VSG}}{dt} + K_D \Delta\omega_{VSG}$$



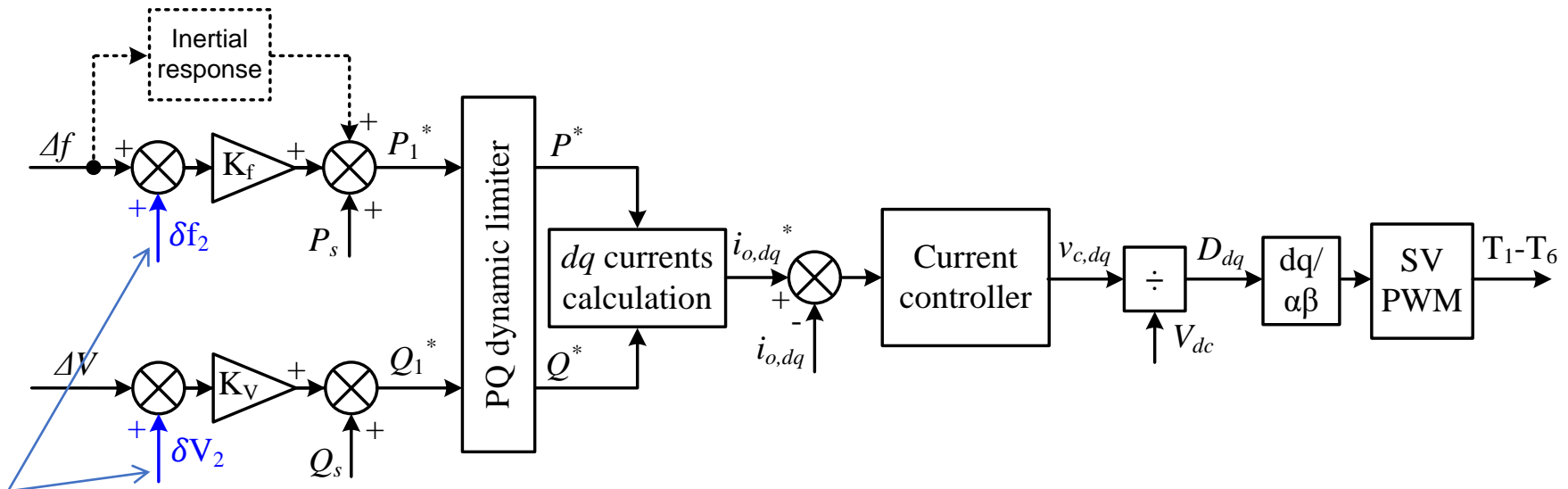
Comunicaţie  
microreţea





# Schema de control inverteoare suport

- Invertoarele suport asigura sarcina în regim permanent în microreţea din diferite surse (RES, stocare, etc.)
- Invertorul coordonator transmite aceleaşi 2 semnale tuturor invertoarelor suport. Semnalele nu se modifică odată cu schimbarea regimului!



De la invertorul coordonator





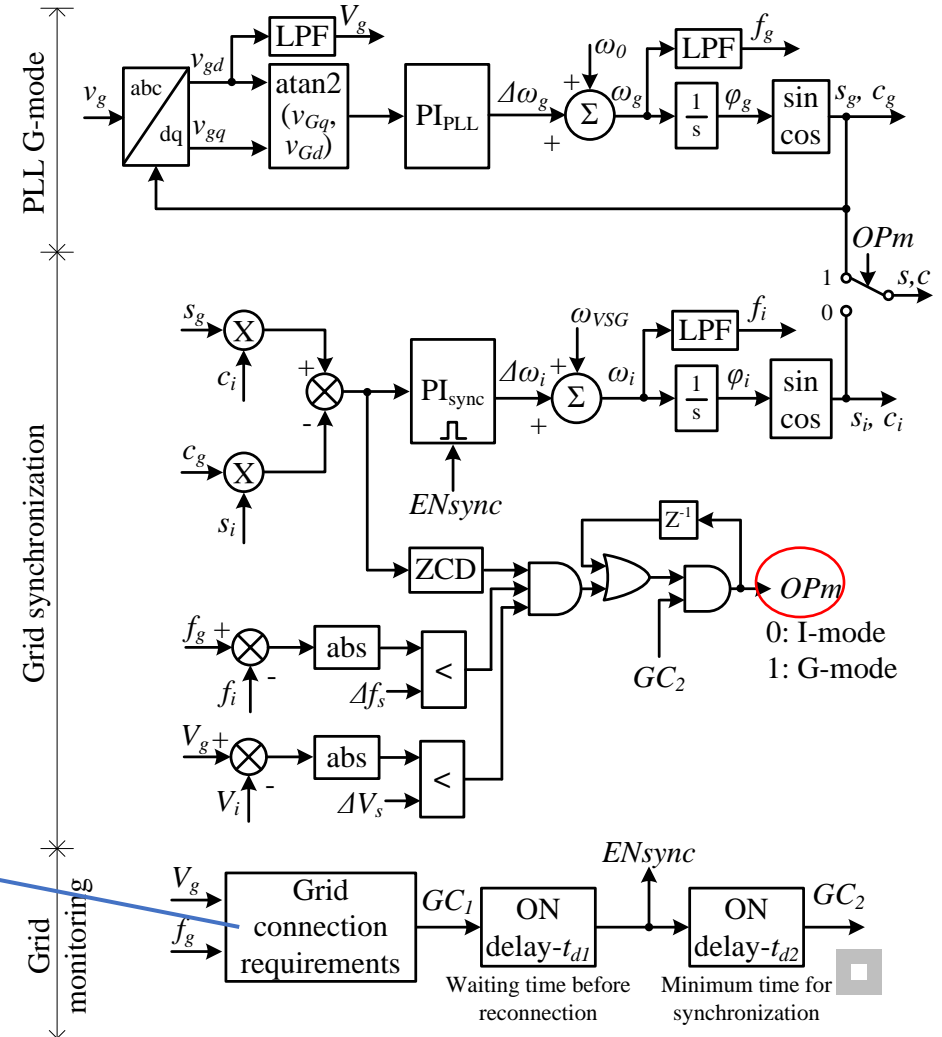
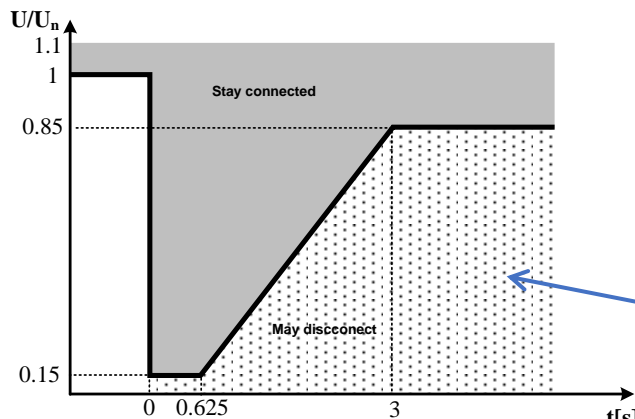
# Transferul dintre cele două regimuri

■ Implementare la nivelul inverterului coordonator

■ Include 3 subsisteme:

- PLL – funcţionare pe reţea
- Sincronizare cu reţeaua la transferul din insularizat
- Monitorizarea parametrilor reţelei şi implementarea condiţiilor de conectare:

Condiţie preluată din normativul românesc de conectare a centralelor PV/eoliene la reţea.





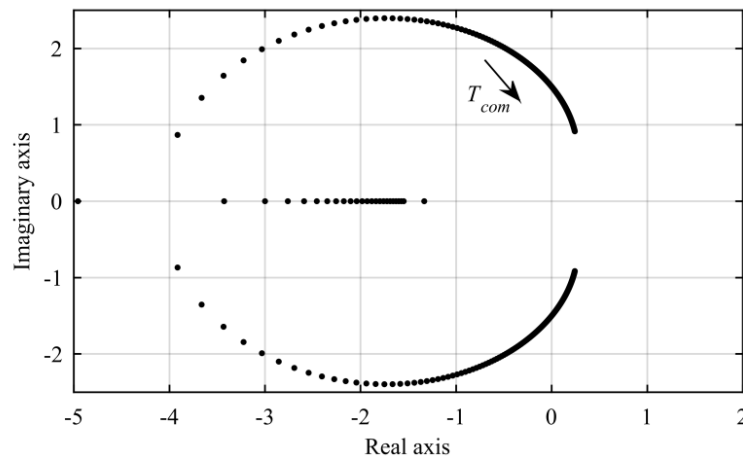
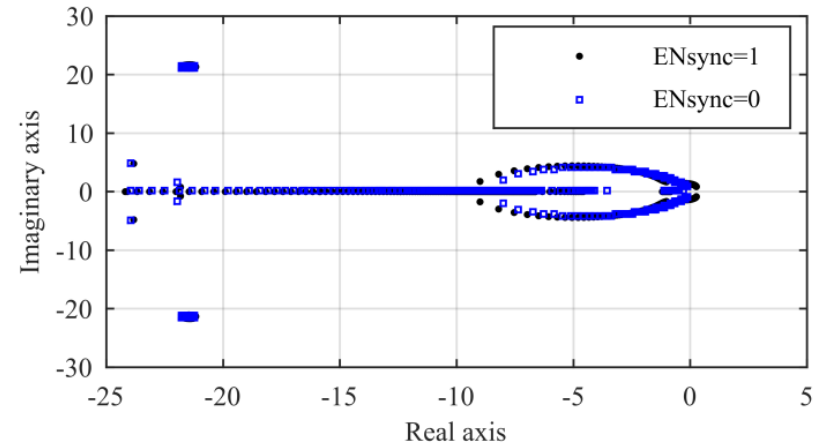
# Efectul comunicației asupra performanțelor microrețelei

■ Întârzierea pe linia de comunicație afectează performanțele microrețelei;

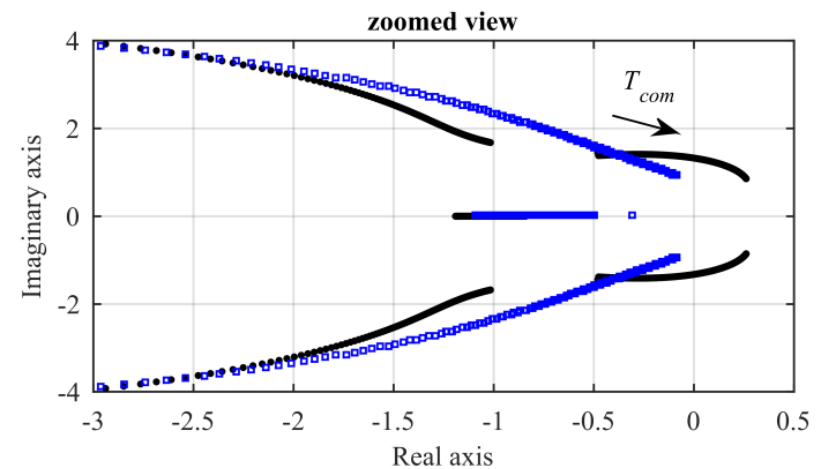
■ Analiză efect  $T_{com}$ :

■ Insularizat la valori diferite ale inerției virtuale și cu regulatorul de sincronizare cu rețeaua activat/dezactivat;

■ Conectat la rețea.



În regim conectat la rețea ( $T_{com}=0...2s$ )

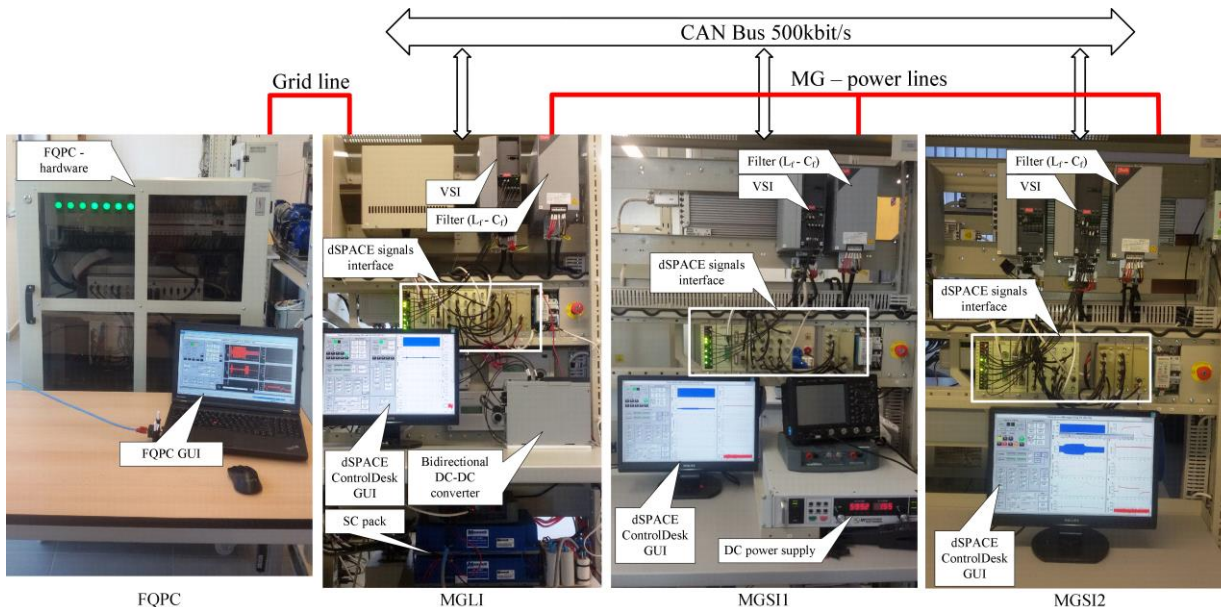
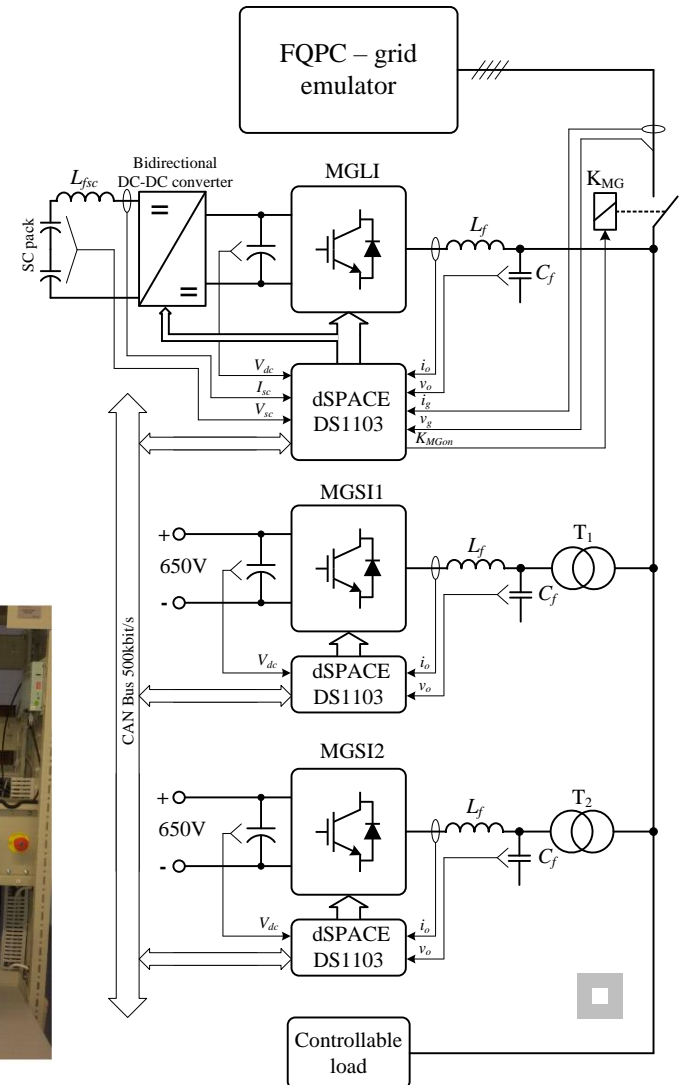


În regim insularizat ( $T_{com}=0...2s$ )



# Validări experimentale

- Microreţea dezvoltată în cadrul ICDDT\_L04:
  - 3 invertoare 5kW – 1 coordonator + 2 suport
  - Convertor în 4 cadrane - emulator de reţea
  - Sarcină controlabilă electronic 9kW
  - Comunicaţie CAN 500kbit/s
  - Sursă c.c. 650V/6kW



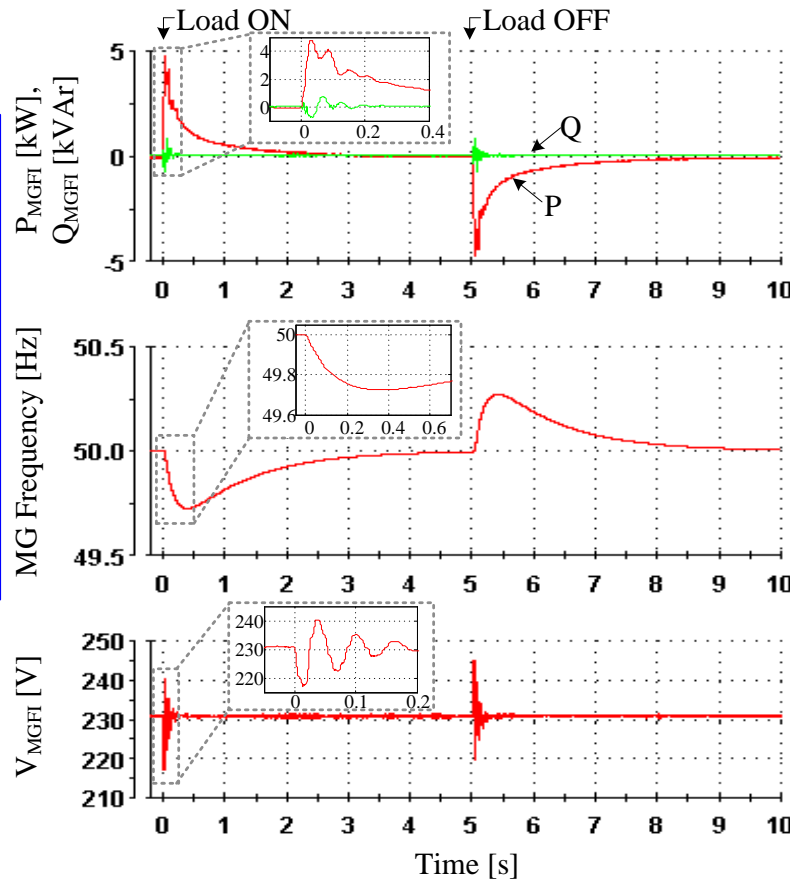




# Rezultate experimentale - insularizat

## ■ Modificare sarcină microreţea

### Invertor coordonator

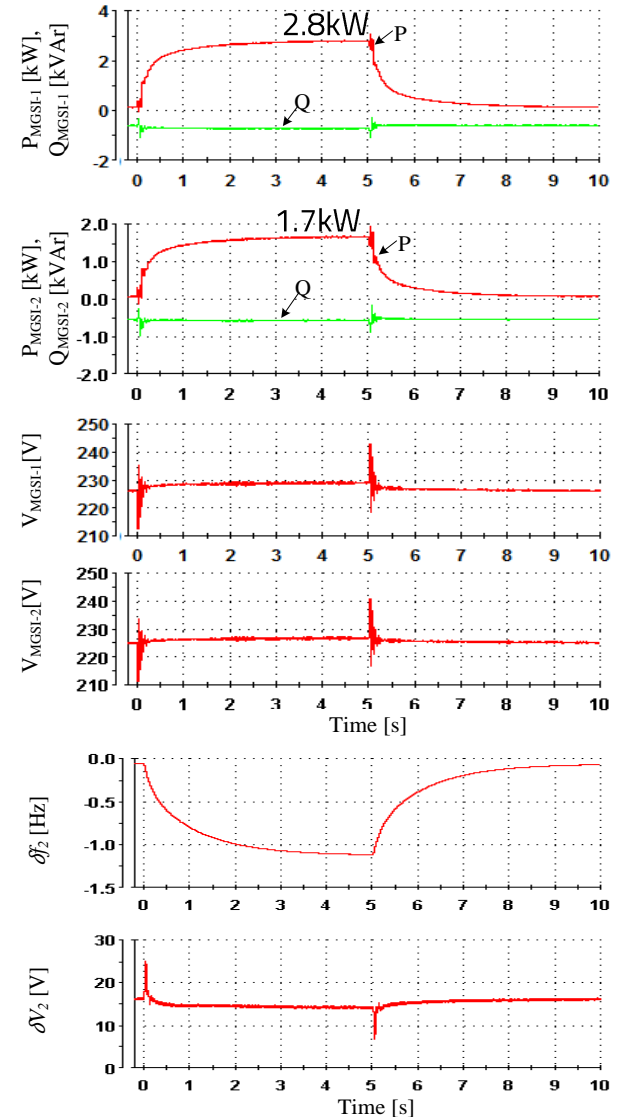


$$P_{pk} \cong 4.5kW$$

$$\Delta f_{dyn} = 0.28Hz$$
$$RoCoF = 2.3Hz/s$$
$$t_{sf} \cong 4s$$

$$\Delta V \cong \pm 15V$$
$$t_{sV} \cong 0.2s$$

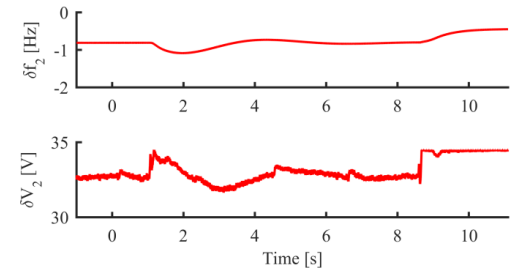
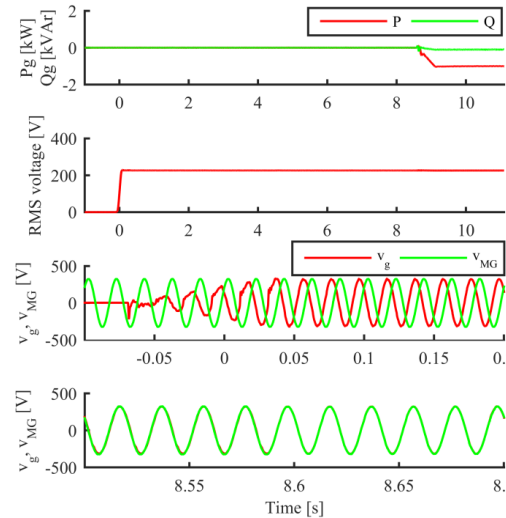
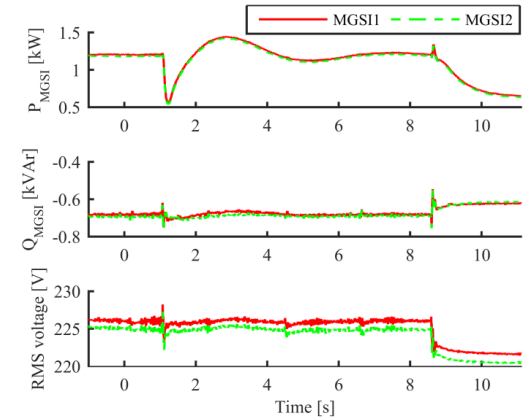
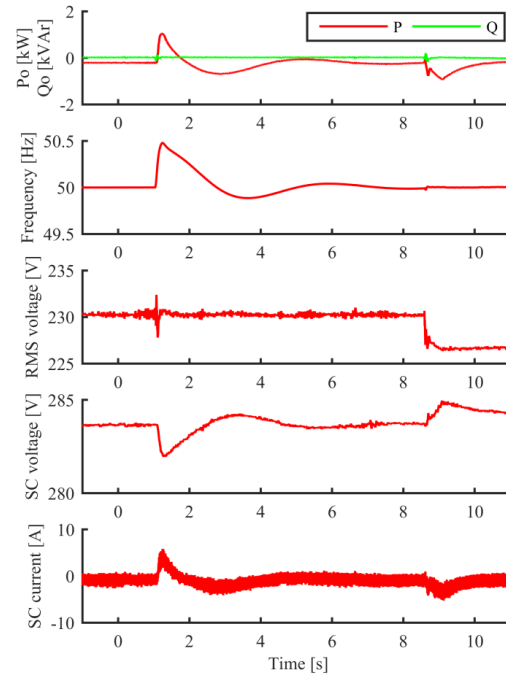
### Invertoare suport





# Rezultate experimentale - pe reţea

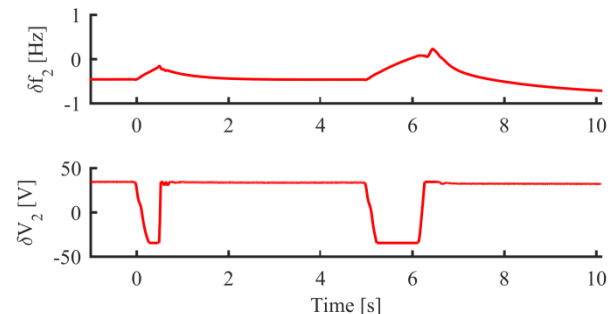
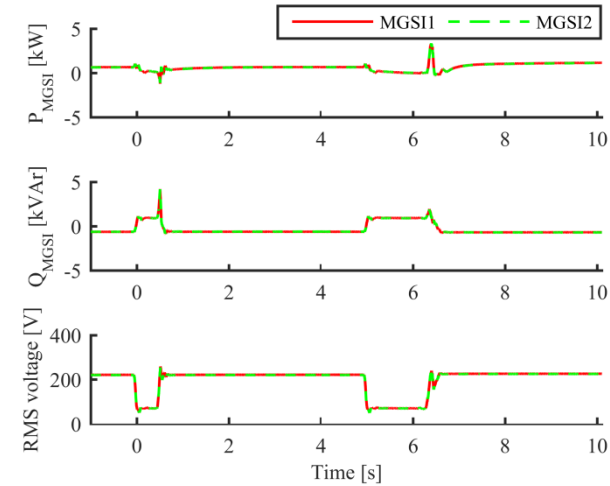
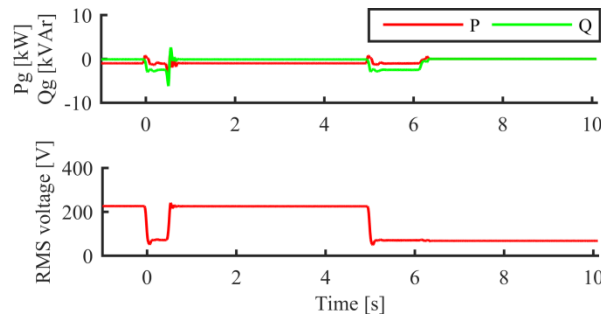
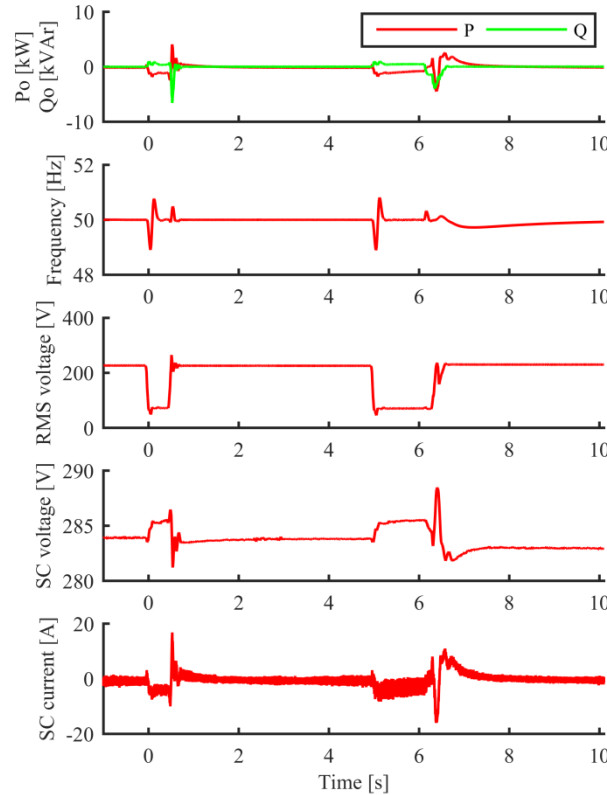
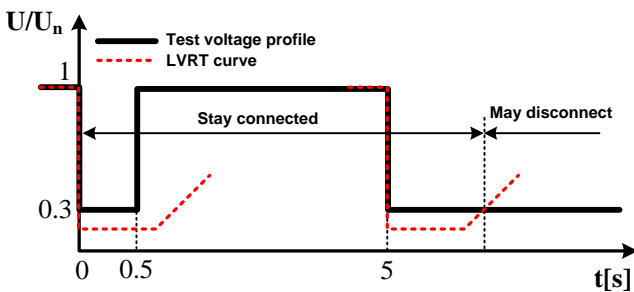
- Sincronizare și conectare microreţea la reţea





# Rezultate experimentale - pe reţea

- Deconectarea microreţelei de la reţea – implementare criteriu de deconectare adaptat din normativ centrale PV/eoliene:





## Sinteză realizări - Cap. 3

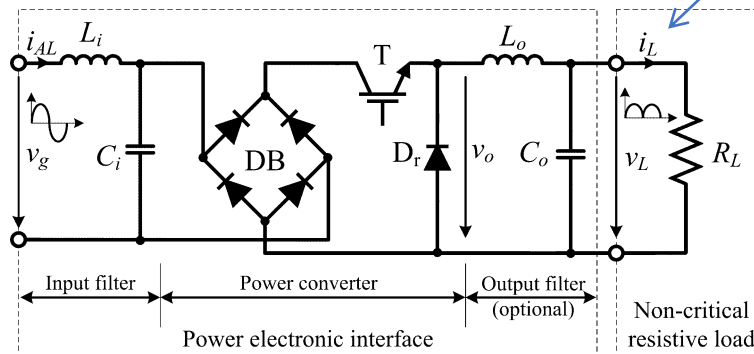
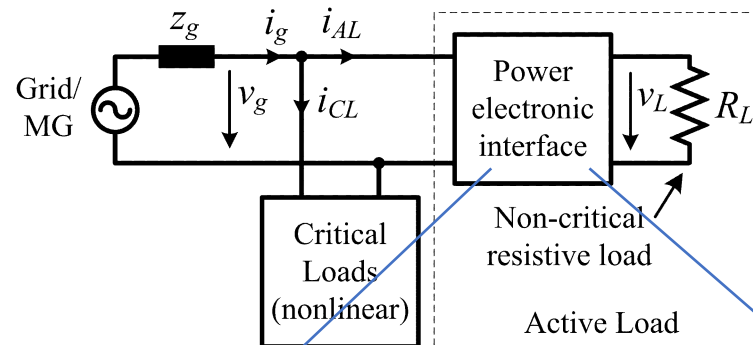
- Studiu efectuat în cadrul proiectului Tinere Echipe desfășurat în perioada Oct. 2015 – Nov. 2017
  - Rezultate publicate în conferințe internaționale și două jurnale Elsevier de top [1], [2].
  - Planuri de dezvoltare viitoare:
    - Comunicația în microrețele, cu fir și wireless – colaborare Univ. Chile
    - Conectarea microrețelelor la rețea - coduri specifice în viitor
    - Integrarea stațiilor de încărcare EV în microrețele.
- 
1. I. Serban, "A control strategy for microgrids: Seamless transfer based on a leading inverter with supercapacitor energy storage system", Applied Energy, 2018. FI=7.9
  2. I. Serban, C.P. Ion, "Microgrid Control Based on a Grid-Forming Inverter Operating as Virtual Synchronous Generator with Enhanced Dynamic Response Capability", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2017. FI=3.61



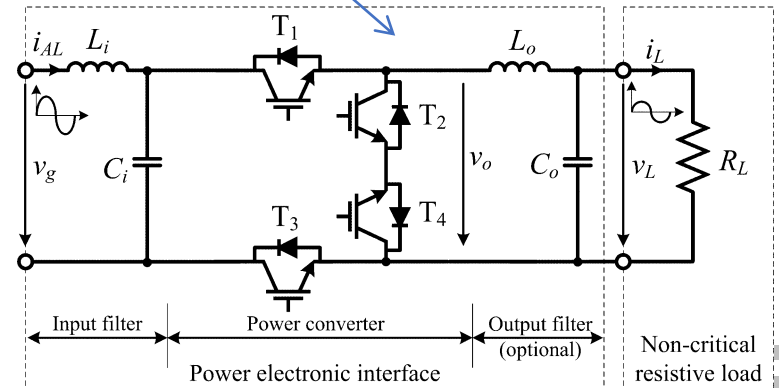


# Cap. 4 Controlul sarcinilor active pentru îmbunătăţirea calităţii energiei în microreţele cu surse regenerabile de energie

- Structură şi soluţie de control pentru sarcini active ce asigură:
  - Participare la reglajul frecvenţei în microreţele;
  - Compensarea de armonici – funcţie secundară.



Varianta 1

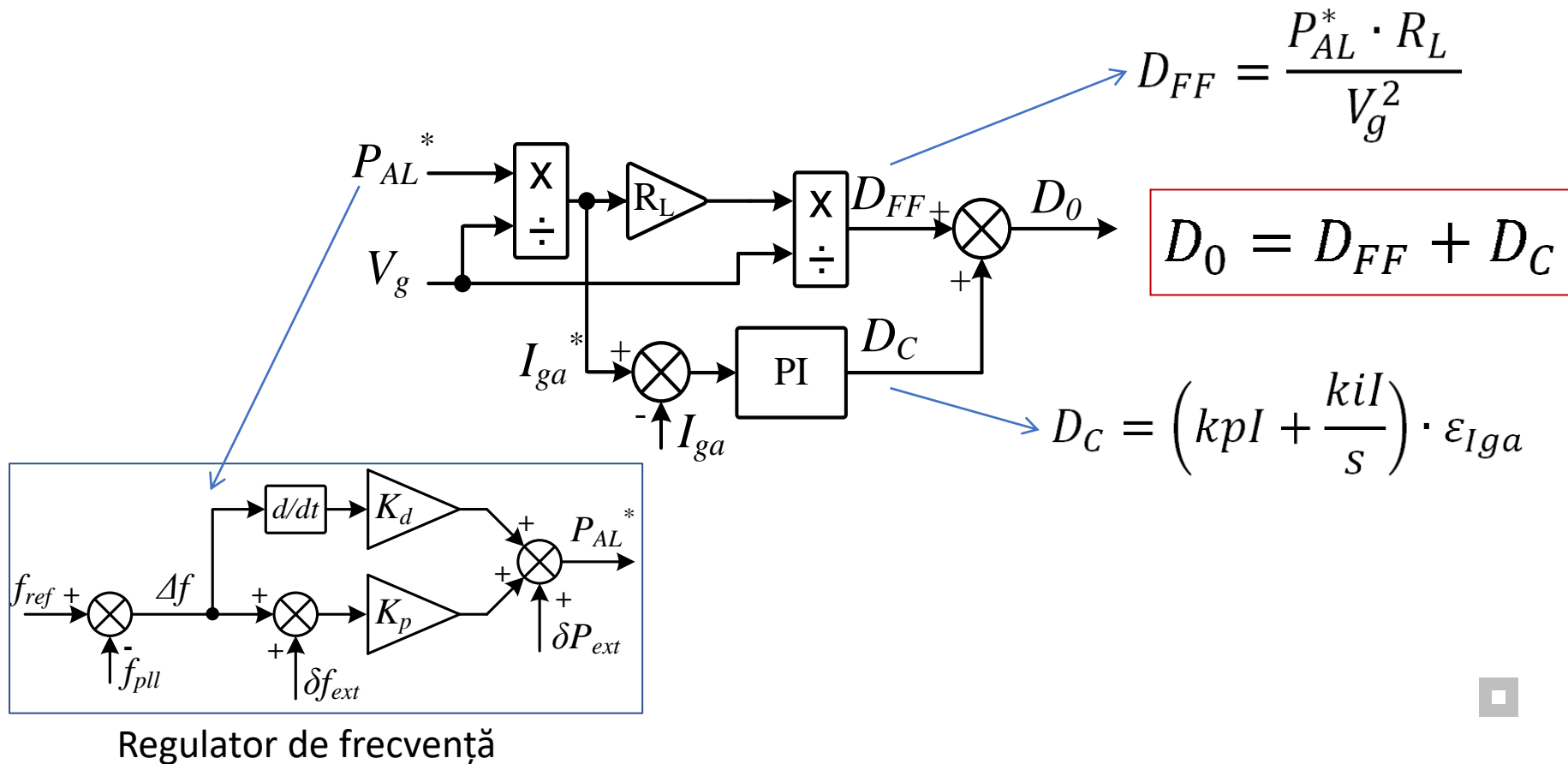


Varianta 2



# Schema de control – componenta fundamentală a curentului

- Buclă de reglare ce asigură controlul rapid al curentului sarcinii în funcție de referința de putere activă ( $P_{AL}^*$ ), ce poate fi constantă sau dată de un regulator de frecvență:





# Schema de control – compensare de armonici

- O funcție secundară cu rol de compensare a armonicilor produse de o sarcină neliniară învecinată (ex. din cadrul aceleiași consumator):

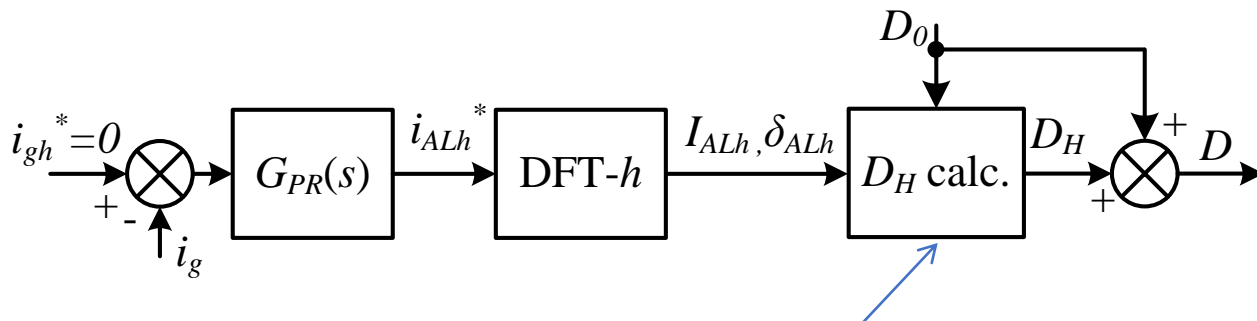
$$i_{AL}(t) = i_{AL1}(t) + i_{ALh}(t)$$

$$i_{ALh}(t) = \sum_{h=3,5,7,9} I_{ALh} \sin(h\omega t + \delta_{ALh})$$

$$D_H(t) = \sum_{h=3,5,7,9} D_{h-1} \sin[(h-1)\omega t + \varphi_{h-1}]$$

$$D_{h-1} = \sqrt{D_{h+1}^2 + \frac{4R_L^2}{V_g^2} I_{ALh}^2 + \frac{4R_L}{V_g} I_{ALh} D_{h+1} \sin(\varphi_{h+1} - \delta_{ALh})}$$

$$\varphi_{h-1} = \text{atg} \left[ \frac{V_g D_{h+1} \cos \varphi_{h+1} - 2R_L I_{ALh} \sin \delta_{ALh}}{-V_g D_{h+1} \sin \varphi_{h+1} - 2R_L I_{ALh} \cos \delta_{ALh}} \right] - \frac{\pi}{2}$$



$$D(t) = D_0 + D_H(t)$$



# Validări experimentale

## Principali parametri:

- $P_{AL}=3\text{kW}$  (230V; 50Hz)

- $f_{\text{PWM}}=15\text{kHz}$ ;

- $L_i=400\mu\text{H}$ ;  $C_i=10\mu\text{F}$ ;

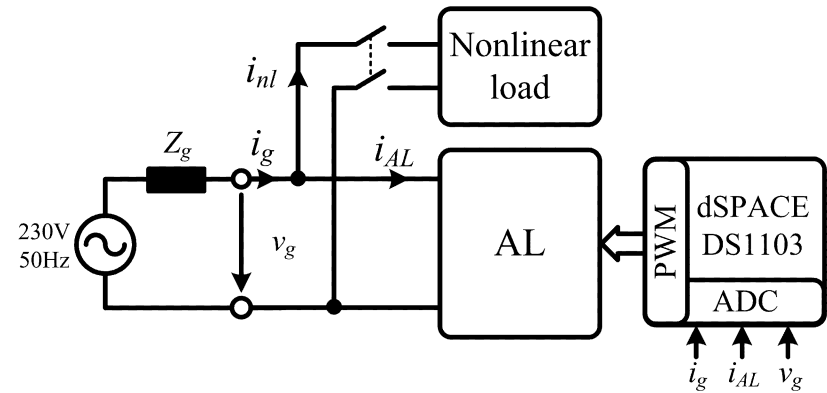
- $Z_g = 0.4+j0.55\Omega$

- $P_{CL}=0.5\text{kW}$  (sarcina neliniara - critică)

## Cazuri analizate:

- Suport frecvență micorețea;

- Compensare armonici.

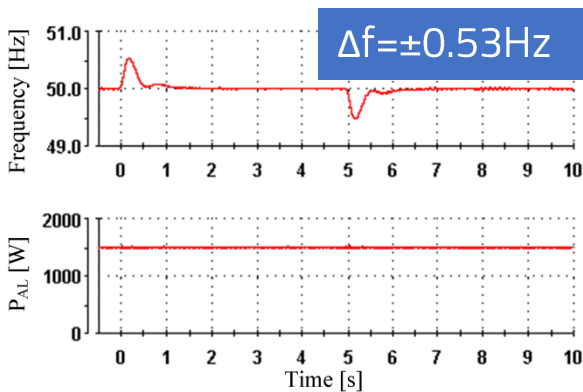




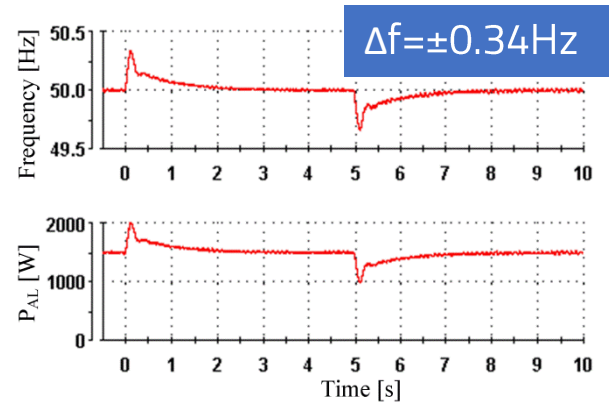


# Rezultate experimentale – suport frecvență

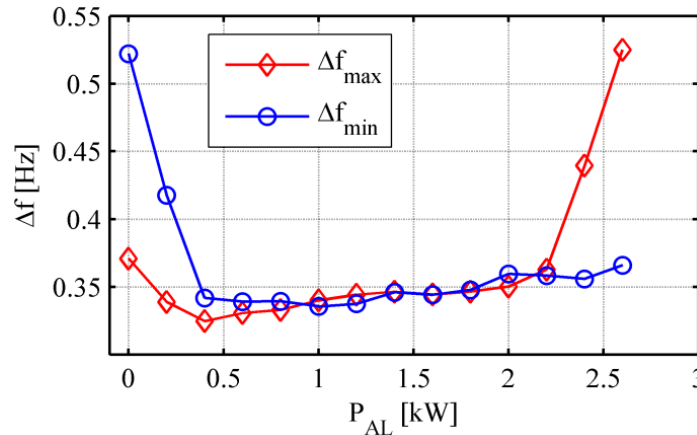
## Contribuția sarcinii active la reglarea frecvenței în microrețea



Regulator de frecvență dezactivat



Regulator de frecvență activat



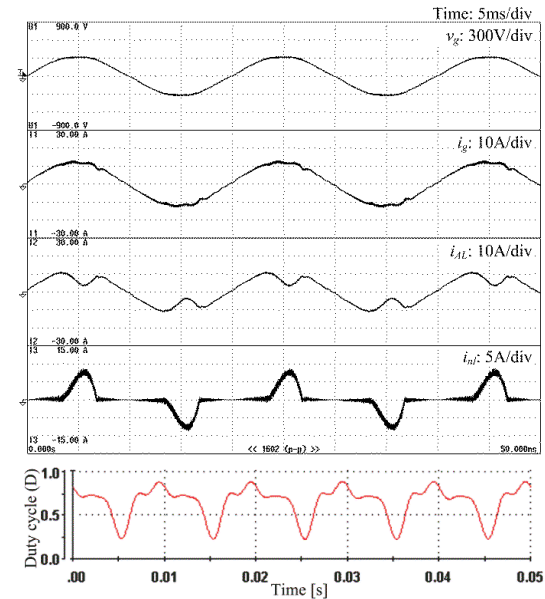
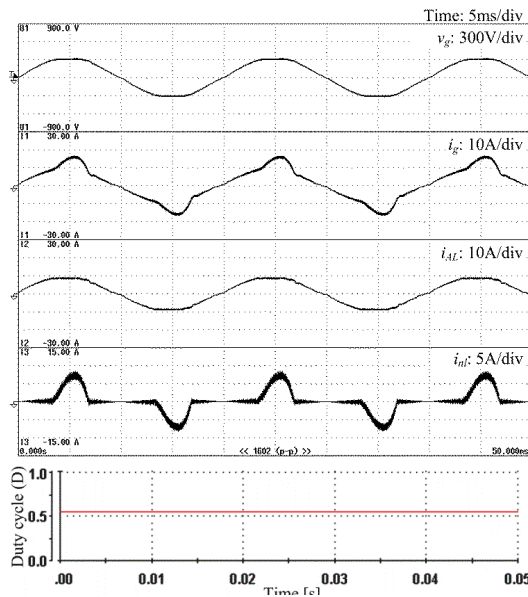
Limitări ale sarcinii active de a asigura suportul de frecvență în microrețea.



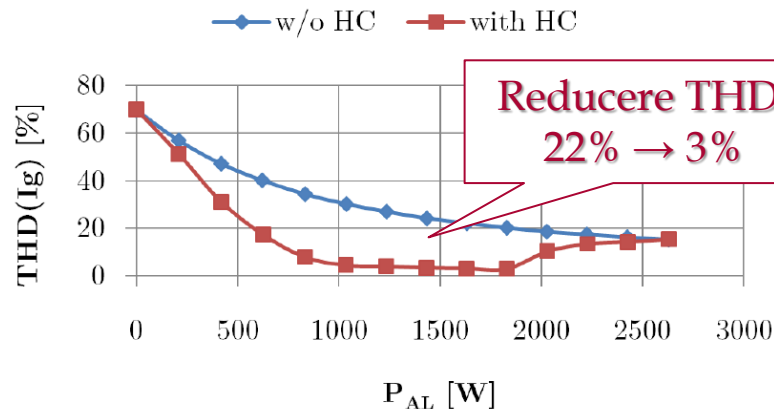


# Rezultate experimentale – compensare armonici

## ■ Efectul compensatorului de armonici al sarcinii active:



Compensator de  
armonici dezactivat



Compensator de  
armonici activat





## Sinteză realizări - Cap. 4

- O primă variantă dezvoltată de autor în 2008 în cadrul tezei de doctorat;
- Brevet de invenție OSIM obținut pentru structură și principiu de control [1];
- Variantă îmbunătățită în 2016 (proiect Tinere Echipe);
- Propunere de brevet OSIM pentru varianta îmbunătățită cu funcția de compensare a armonicilor [2];
- Rezultate publicate în conferințe internaționale și o revistă ISI-WOS [3].

1. I. Serban, C. Marinescu, „Dispozitiv de reglare cu sarcină de balast trifazată pentru generatoare autonome cu surse de energie regenerabile”, brevet OSIM RO-126355/30.01.2017.
2. I. Serban, „Metodă de compensare a armonicilor de curent cu sarcină activă”, propunere brevet OSIM, cerere A/00881/27.10.2017.
3. I. Serban, "Active Load Control for dynamic frequency support and harmonic compensation in autonomous microgrids", ASCE's Journal of Energy Engineering, 2018. FI=1.346





# Sumar al activităţii de cercetare

- Proiecte de cercetare: 9 din care 2 desfăşurate ca director de proiect
- Articole indexate ISI-WOS: 40 din care 31 ca prim autor și 14 reviste (factor de impact cumulat = 49, conf. JCR2017)
- Articole indexate BDI: 20 (7 reviste, 13 conferințe)
- Brevete de invenție: 1 brevet OSIM acordat și 3 aplicații de brevet depuse
- Citări în articole indexate ISI-WOS: peste 300
- Nr. total de citări, conform Google Scholar: peste 700
- Indicele Hirsch: 15 (Google Scholar), 11 (Scopus), 10 (ISI-WOS)
- Recenzii articole în reviste cotate ISI-WOS: peste 100 (majoritatea IEEE)
- Cărți publicate în edituri naționale (prim autor și coautor): 4
- Un premiu internațional „Premium Award for Best Paper în IET Renewable Power Generation” acordat de organizația The Institute of Engineering and Technology (IET) în anul 2015





# Cariera academică

- Conferențiar: 2014 – prezent
- Șef de lucrări: 2009-2014
- Cercetător post-doc: 2010-2013
- Doctorat: 2004-2008, Titlu: „Contribuții la dezvoltarea sistemelor hibride cu surse de energii regenerabile”, coordonator: prof.dr.ing. Corneliu Marinescu.
- Stagii de cercetare la Universitatea Aalborg, Danemarca: 2011, 2008, 2007.
- Cursuri predate: Programarea calculatoarelor (Matlab), Microrețele electrice inteligente, CAD în electronica de putere, CAD pentru sisteme electrice, Instrumentație asistată de calculator, Instalații electrice la consumatori.
- Coordonator teze de licență și dizertație.



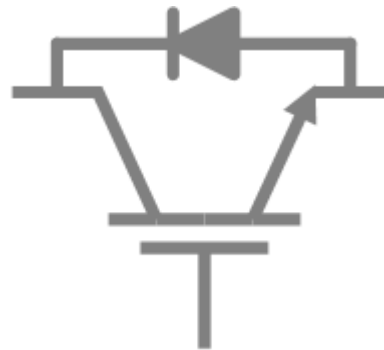


# Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei

**Motto:** “Education is not the learning of facts, but the training of the mind to think”,  
*Albert Einstein*

- Menținerea direcției create și creșterea continuă a impactului și vizibilității rezultatelor științifice;
- Consolidarea unei echipe de cercetare în cadrul departamentului IEFA și atragerea de tineri doctoranzi;
- Menținerea parteneriatelor existente și deschiderea de noi colaborări naționale și internaționale;
- Atragerea de finanțare prin contracte de cercetare naționale și internaționale;
- Publicarea rezultatelor în reviste internaționale de prestigiu.

Cercetare



Didactic

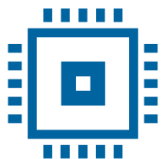
- Creșterea calității actului didactic prin diversificarea metodelor de predare, punând accent pe interactivitate, implicarea studenților în proiecte și aplicații practice;
- Creșterea nivelului de implicare a studenților în activități de cercetare;
- Îmbinarea activităților didactice cu cele de cercetare cu scopul de îmbunătățire a pregătirii studenților, atât teoretice cât și practice.



# Vă mulțumesc!



**Conf.dr.ing. Ioan ȘERBAN**



**Universitatea  
Transilvania  
din Brașov**

**FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ  
ȘI ȘTIINȚA CALCULATOARELOR**

