Rezumat al activităților derulate în anul 2017 în cadrul proiectului PN II–RU–TE–2014–4–1761: Controlul Ierarhizat Inteligent al Sistemelor Distribuite de Producere și Utilizare a Energiei Electrice

Această etapă a avut, în conformitate cu Planul de realizare a proiectului, patru obiective:

- 1. Realizarea convertorului bidirecțional pentru transferul energiei înspre/dinspre rețea;
- 2. Realizarea sistemului de dezvoltare pentru conducerea sistemelor integrate de producere și utilizare a energiei electrice;
- 3. Working/training visit;
- 4. Validarea în mediul fizic a structurii și algoritmilor de conducere a sistemului integrat de producere și utilizare a energiei electrice.

An		Obiective	Activități
2017	Etapă unică	Realizarea convertorului bidirecțional pentru transferul energiei înspre/dinspre rețea	Stabilirea structurii și realizarea sistemului de conectare la rețea ("Inverter/APF")
		Realizarea sistemului de dezvoltare pentru	Stabilirea structurii sistemului de dezvoltare pentru conducerea sistemelor integrate de producere și utilizare a energiei electrice
		conducerea sistemelor integrate de producere și utilizare a energiei electrice	Realizarea și testarea sistemului de dezvoltare
		Working/training visit	Working/training visit
		Validarea în mediul fizic a structurii și algoritmilor de	Implementarea în mediul fizic a soluției de conducere ierarhizată a sistemului integrat
		conducere a sistemului integrat de producere și utilizare a energiei electrice	Testarea soluției de conducere ierarhizată a sistemului integrat utilizând diferite scenarii privind variabilele exogene aleatoare și stabilirea parametrilor finali ai structurii de conducere

Activitățile aferente celor patru obiective pot fi observate în tabelul următor:

Obiectivele asumate în anul 2017 au fost îndeplinite integral, fiind realizate în proporție de 100% toate activitățile prevăzute în cadrul planului de realizare. În cadrul etapei de derulare 2017 au fost obținute următoarele rezultate de diseminare: 4 articole la conferințe indexate BDI în IEEE Xplore, toate fiind în curs de indexare ISI Proceedings, precum și o teză de doctorat pentru care s-a obținut titlul de doctor, confirmat prin Ordinul Ministrului Educației Naționale nr. 4097/20.06.2017.

Obiectiv I: Realizarea convertorului bidirecțional pentru transferul energiei înspre/dinspre rețea

1. Stabilirea structurii și realizarea sistemului de conectare la rețea ("Inverter/APF")

Sistemul se conectează la rețea printr-un punct de conectare la care sunt conectați și consumatorii locali. Filtrul activ este de tip derivație, cu elemente de control a armonicelor de curent pentru fiecare fază a rețelei trifazate și cu impunerea de curent de nul prin traseul nulului de lucru.

Structura hardware a filtrului este de tip invertor de tensiune cu 4 brațe active, realizate cu module IGBT de putere (100A, 1200V), iar partea de control constă în realizarea a 4 bucle de reglare a curentului și o buclă superioară (lentă) de reglate a tensiunii în interiorul invertorului.

Au fost prevăzute traductoare pentru tensiunile de fază, curenții de fază și nul, precum și traductoare de curent pentru curentul injectat de filtrul activ în punctul comun de conectare. Pentru obținerea referinței de formă/curba curentului absorbit din rețea sunt utilizate traductoare de tensiune de fază, iar traductoarele de curent dinspre rețea sunt folosite pentru implementarea buclelor de control a curentului. Traductoarele de curent conectate la ieșirea filtrului activ sunt

utilizate doar pentru monitorizarea curentului vehiculat de filtru, în scopul implementării protecției la suprasarcină.

În partea de tensiune continuă a filtrului activ există un traductor de tensiune și un traductor de curent, utilizate pentru implementarea buclei de reglare a tensiunii interne invertorului.

Invertorul de tensiune se conectează la rețea prin intermediul a 4 inductanțe realizate pe miez feromagnetic.

Condensatorul de stocare a energiei în filtrul activ constă dintr-un grup serie-paralel de condensatoare de 470uF/450V, astfel încât tensiunea de lucru poate fi 700V, valoare necesară funcționării corecte a buclelor de reglare a curentului.

Componentele generatoare de perturbații electro-magnetice (inductanțele cu întrefier) și condensatorul au fost asamblate în interiorul unei cutii metalice (fier).

Bucla de reglare a tensiunii are la bază un regulator de tip P (proportional), fără componentă integratoare, pentru a elimina supratensiunile cauzate de deconectarea consumatorilor (caracteristica intrinsecă a strategiei de control impusă pentru funcționarea filtrului activ). O eroare staționară de până la 10% este acceptabilă atât pentru funcționarea buclelor de reglare a curentului cât și pentru extragerea informației necesare calculării amplitudinii curentului minim de rețea.

Modulul electronic pentru implementarea buclei de curent (realizat fizic: 4 module – 3 faze + nul) are la bază un microprocesor de tip DSPIC33FJ128MC804, destinat aplicațiilor în comutație. Acest modul primește informație analogică de la traductoarele de curent și tensiune din punctul de conectare la rețea, precum și informația de eroare de reglare a tensiunii pe condensator. Conform strategiei de control a filtrului activ, curba de tensiune a rețelei (dacă tensiunea e distorsionată se poate reface forma sinusoidală cu o buclă PLL) se înmulțește matematic cu eroarea de tensiune de pe condensatorul de tensiune continuă al invertorului și astfel, se obține referința de curent pentru fiecare fază a rețelei. Pentru firul de nul se impune ca valoarea curentului să fie zero, indiferent de timp.

Modulul electronic pentru implementarea buclei de tensiune conține traductoarele de tensiune și curent aferente etajului de tensiune continuă din invertor precum și un microcontroller de tip DSPIC33FJ128MC804 pentru implementarea regulatorului de tensiune.

Modulul electronic pentru achiziția semnalelor din punctul comun de conectare la rețea integrează componentele din punctul comun de conectare la rețea: traductoarele de curent de pe fiecare fază și nul, traductoarele de tensiune dintre fiecare fază și nul, traductoarele de curent vehiculat prin fiecare braț al filtrului activ. Structura compactă asigură interferențe electromagnetice minime între traseele de curent mare și ieșirile de semnal mic ale traductoarelor. Pentru fiecare traductor au fost prevăzute câte două ieșiri, una în domeniul 0-3,3V – pentru a utiliza semnalul la intrarea analogică a procesoarelor DSPIC, și una în domeniul -10V;+10V, pentru a afișa semnalul pe PC, prin intermediul intrarilor analogice ale sistemului de achiziție numerică dSpace DS1103.

Inductanțele necesare conectării filtrului activ la rețea au reprezentat partea tehnologică cea mai dificilă din realizarea filtrului activ. Soluția adoptată a constat în utilizarea unor inductoare gata realizate pe miez de fier cu tole bobinate, astfel încât pierderile cauzate de comutația invertorului la frecvența de 20kHz să fie cât mai mici.

2. Implementarea buclelor de reglare din filtrul activ/invertor

Filtrul activ funcționează independent de sistemul de calcul numeric de pe stand, bazându-se pe propriile bucle de reglare, implementate în procesoarele numerice locale. Frecvența de lucru a procesoarelor din filtrul activ este 80MHz, iar fiecare instrucțiune se execută în 2 perioade ale semnalului de ceas. Aplicațiile software au fost scrise în limbajul Mikropascal.

Pentru achiziția semnalelor alternative, deoarece domeniul de intrare al convertorului analognumeric este doar între 0 și 3,3V, semnalul analogic este centrat pe 1.5V. La inițializarea procesorului s-a implementat o funcție prin care valoarea de offset a semnalelor analogice este măsurată cu precizie și apoi este extrasă din valoarea numerică rezultată la sfârșitul fiecărei conversii.

Bucla de reglare a tensiunii se realizează într-o buclă infinită, lentă:

while 1 do
begin
//valoarea tensiunii de pe condensator
tmp1_longint:=UDC;
//calculul erorii de tensiune pe condensator
//tmp2_longint:=3*UR_redresat-tmp1_longint;
tmp2_longint:=1100-tmp1_longint; //650Vcc
//constante KP KI pentru regulatorul de tensiune
tmp2_longint:=4*tmp2_longint;
if tmp2_longint>1000 then tmp2_longint:=1000;
errUDC:=integer(tmp2_longint);
pwm_set(2047-errUDC); //valoare centrata pe 50% ca sa functioneze si pentru injectie in retea
afisare_valori();
end;

Bucla de reglare a curentului se realizează în interiorul unei întreruperi de timp real, ce se activează cu frecvența de 20kHz, sincron cu semnalul PWM generat la ieșirea de comandă.

Pentru funcționarea ca invertor de tensiune, bucla de reglare a curentului se înlocuiește cu o buclă de generare a unui semnal PWM cu factor de umplere variabil după o lege sinusoidală.

3. Verificarea funcționării invertorului de tensiune ca filtru activ derivație

Pentru o sarcină monofazată de tip punte redresoare cu ieșire RC s-au achiziționat următoarele forme de undă (figura I.1): canalul 1 al osciloscopului = tensiunea de fază (230Vca); canalul 2 al osciloscopului = curentul de sarcină (5A la vârf). Spectrul formei de undă a curentului este reprezentat în figura I.1b).

După activarea filtrului activ aceleasi semnale devin precum cele din figura I.2). Se observă faptul că forma curentului de rețea a devenit aproape sinusoidală, iar amplitudinea a scăzut. Consumul propriu al filtrului activ este dat de pierderile de comutație pe fiecare braț comandat al invertorului. Frecvența de comutație este de 20kHz, și se află la limita superioară recomandată pentru modulele IGBT utilizate.



Fig. I.1. Sarcină punte redresoare cu ieșire RC – filtru activ oprit: a) CH 1- tensiunea de fază, CH 2- curentul absorbit; b) spectrul curentului absorbit/de sarcină



Fig. I.2. Sarcină punte redresoare cu ieșire RC – filtru activ activat: a) CH 1- tensiunea de fază, CH 2- curentul absorbit; b) spectrul curentului absorbit/de sarcină

În cazul conectării consumatorului punte redresoare cu sarcină RC, împreună cu o sarcină rezistivă de 400 W (plită electrică), s-au achiziționat: tensiunea și curentul de fază (figura I.3a), iar după act<u>ivarea filtrului activ, curentul a devenit precum cel reprezentat în figura I.3b).</u>



Fig. I.3. Sarcină punte redresoare cu ieșire RC și sarcină rezistivă de 400W: a) filtru activ oprit: CH 1 - tensiunea de fază, CH 2- curentul de sarcină; b) filtru activ activat/pornit: CH 1 - tensiunea de fază, CH 2- curentul de sarcină

<u>Rezultatele următoare evidențiază funcționarea filtrului activ și în regim de invertor.</u> Pentru alimentarea consumatorilor locali prin intermediul filtrului activ, s-a procedat la injectarea unui curent continuu în condensatorul de tensiune continuu al invertorului de tensiune. Înainte de injecția de curent, forma de undă a curentului de fază de la rețea a fost precum cea reprezentată în figura I.4a). După conectarea sursei de curent continuu la filtrul activ, amplitudinea curentului de rețea a devenit aproape nulă (figura I.4b). Din echilibrul energetic dintre filtru, consumator, sursa auxiliară de curent și rețea, curentul de rețea poate fi în fază cu tensiunea rețelei, zero sau în antifază. Curentul de rețea de nul, cu consumator în regim de funcționare înseamnă alimentarea consumatorului din sursa auxiliară de curent, prin intermediul filtrului activ.



Fig. I.4. a) funcționarea filtrului activ în regim de compensare; b) funcționarea filtrului activ în regim de invertor

În concluzie, s-a demonstrat că echipamentul realizat în cadrul proiectului poate funcționa atât în regim de invertor, cât și în regim de filtru activ de putere. În acest mod, fiind posibilă gestionarea fluxului de energie dinspre/înspre rețea, respectiv compensarea perturbațiilor și a energiei reactive.

Obiectivul II: Realizarea sistemului de dezvoltare pentru conducerea sistemelor integrate de producere și utilizare a energiei electrice

1. Stabilirea structurii sistemului de dezvoltare pentru conducerea sistemelor integrate de producere și utilizare a energiei electrice

1.1. Alegerea topologiei și realizarea convertoarelor c.c.-c.c. pentru conversia energiei

<u>regenerabile</u>

În continuare se prezintă modificările făcute la convertoarele de c.c.-c.c., față de variantele din *Raportul științific aferent etapei 2016*.

Stabilirea topologiei ține cont de nivelele de tensiune de intrare și de ieșire, de necesitatea izolării galvanice și a unei legături comune între intrare și ieșire. Pentru a extrage puterea maximă de la sursa PV, se poate folosi un circuit *boost* iar pentru sursa de energie eoliană este nevoie de un *buck-boost*, punte H cu transformator sau SEPIC. A fost aleasă configurația SEPIC datorită similitudinilor cu circuitul *boost* a conexiunilor componentelor electrice de putere.

Dezavantajul topologiei SEPIC constă în faptul că tensiunea la bornele comutatorului static Q1 și curentul prin Q1 vor atinge, prin proiectare, suma valorilor de intrare și ieșire, fără a lua în considerare eventualele evenimente tranzitorii. Din acest motiv, pentru SEPIC au fost folosite IGBT-uri iar pentru boost MOSFET-uri.

Nu s-a folosit izolație galvanică între circuitele de putere și de control; măsurarea tensiunii a fost făcută cu un divizor rezistiv iar achiziția curentului a fost făcută cu traductoare specializate ACS758-100U cu efect Hall. Toate traductoarele sunt însoțite de filtre *low pass* și convertoare de nivel de tensiune. Pentru interfața cu utilizatorul a fost alocată o mică zonă, laterală în cutia de procesare, cu butoane, LED-uri și conectori BNC pentru achiziția tensiunilor și curenților cu placa dSpace. Un display grafic este conectat pentru a monitoriza variabilele interne. Toate semnalele care conduc la conectorii BNC sunt ecranate și ecranul este conectat în același punct de pe placa de circuite. Deoarece interfața externă este izolată de cutia metalică, nu a fost creată nicio buclă de masă.

Bobinele utilizate în convertoarele c.c.-c.c. au fost construite pe miez de ferită Epcos ETD59, N97. Pentru convertorul *boost* (convertorul dedicat PV), fiecare inductor este realizat cu conductor de cupru de 1,8 mm, obținându-se 2,4mH. Pentru fiecare miez a fost introdus un întrefier de 1,6 mm pentru a preveni saturarea la curenți mari. Pentru convertorul SEPIC (convertorul dedicat sursei eoliene), ambele bobine pentru un braț de convertor sunt realizate pe același miez magnetic, pe capetele opuse ale suportului bobinei. De asemenea, întrefierul a fost de 1,6 mm. Inductanța fiecărei bobine este de aproximativ 0,6mH.

Buclele de control ale convertorului sunt implementate într-un procesor de 16 biți de uz general din familia dsPIC33F, capabil să genereze semnale PWM intercalate, datorită modulului intern Capture/Compare/PWM. Au fost implementate următoarele metode de control:

- cu baleierea factorului de umplere (*duty-cycle sweep*) de funcționare urmată de un salt la valoarea care a oferit puterea maximă de intrare, figura II.1.11. Metoda este utilă pentru PV sau orice altă sursă care acceptă variații rapide de încărcare de la zero la 100% și va găsi punctul de putere maximă indiferent de cât de multe maxime locale există;
- algoritmul clasic *perturbă și observă*, îmbunătățit cu o a doua buclă pentru a găsi perturbația minimă utilizabilă, atât pentru PV, cât și pentru aplicații eoliene. Folosirea acestui algoritm pe turbina eoliană a produs rezultate slabe, deoarece buclele de control trebuie sa acționeze mai lent decât timpul de răspuns dat de inerția generatorului și a palelor;
- metoda conductivității incrementale simplificată;
- controler *proporțional*, unde factorul de umplere urmărește tensiunea de intrare. Această metodă a oferit cele mai bune rezultate pentru turbina eoliană, deoarece tensiunea de ieșire a turbinei este proporțională cu viteza unghiulară a rotorului. Relația dintre ciclul de funcționare și puterea de ieșire nu este liniară, astfel încât întreaga caracteristică a fost împărțită în segmente mai mici, iar coeficientul P a fost determinat experimental pentru fiecare;
- modulator *PWM, cu referință primită de la o sursă externă* (de exemplu, placa de achiziție și control dSpace). Această funcție permite implementarea oricărui algoritm de comandă în exteriorul procesorului digital și utilizarea circuitului convertorului c.c.-c.c. numai pentru comutare c.c.

1.2. Stabilirea structurii emulatorului fotovoltaic

Pentru emulatorul PV necesar atingerii obiectivelor proiectului, în urma unei analize tehnicoeconomice s-a preferat utilizarea unei surse de curent continuu programabile și a unui convertor CC-CC, împreună cu un algoritm de control prima variantă de structură. Patforma experimentală pentru testarea emulatorului PV conține următoarele echipamente: sursa programabilă de tensiune, convertorul CC-CC cu algoritm MPPT integrat, bateria de acumulatori, sarcina rezistivă, PC cu placă de achizitie și control DS1103, cutia de conexiuni PX4, software Matlab și ControlDesk.

Sursa programabilă, de tip Magna Power SL32-46/230+HS, poate genera profilele curenttensiune, așa cum sunt ele găsite la ieșirea panourilor fotovoltaice. Parametrii sursei pot fi configurati cu ajutorul calculatorului, folosind interfata USB sau Ethernet, prin intermediul unei aplicații dedicate. Sursa poate fi programată pentru o gamă largă de profile curent-tensiune. Coordonatele profilelor pot fi modificate manual, pentru a emula caracteristicile panoului fotovoltaic dorit. Aplicația permite ajustarea cracteristicilor emulate ținând cont de condițiile de mediu impuse – iluminare și temperatură. Sursa poate lucra în regim de sursă de curent sau sursă de tensiune.

Parametrii de ieșire nominali sunt 32V și 46A, acestea fiind și limitele impuse de sursă pentru emularea unei caracteristici fotovoltaice. Raportându-ne la parametrii panourilor fotovoltaice disponibile uzual în comerț, cu ajutorul sursei SL32/46 se pot emula, de exemplu, un grup de 5 panouri conectate în paralel, fiecare având 35 de celule în serie (ex. KC130TM). În acest caz, tensiunea va fi 17,6V iar curentul 37A, la punctul de putere maximă. Amplitudinea curentului de scurtcircuit pentru acest sistem de panouri este de 40A, apropiată de maximul de 46A, admis de sursa programabilă. Astfel, puterea maximă a sistemului emulat este de aproximativ 650W. Puterea maximă emulată poate fi crescută prin utilizarea caracteristicilor unor panouri comerciale adecvate sursei, dar care nu sunt, totuși, uzuale.

Convertorul CC-CC asigură interfața dintre sursa fotovoltaică emulată și distribuția de CC (barele de CC). Structura acestuia este una clasică: convertor *boost* cu 4 nivele conectate în paralel. Folosind această structură se poate reduce gabaritul convertorului, deoarece se folosesc componente de putere mai mică, disponibile la prețuri mai scăzute, ale căror caracteristici sunt mai apropiate de cele ideale (rezistență scazută, inductanțe realizate din conductor de secțiune mai mică, frecvența de comutație mai mare), iar frecvența de comutație a convertorului este de 4 ori mai mare (40 kHz) decât cea a etajelor individuale (10 kHz). Parametri limită: traductoarele de curent unidirecționale 0-100A, tranzistoarele MOSFET 50A/150V, diode ultrarapide 20A/200V.

Convertorul a fost realizat într-o primă variantă folosind tranzistoare de putere IGBT, structurat pe module separate (modul de putere, modul de comandă, module de traductoare), pentru a putea face usor teste și modificări pe circuit. După realizarea primului set de teste și validarea structurii, *choppper-ul boost* a fost refăcut și îmbunătățit. <u>În varianta finală s-a păstrat structura de conversie propusă inițial, dar au fost înlocuite tranzistoarele IGBT din etajul de putere cu tranzistoare MOSFET, pentru reducerea pierderilor de putere în comutație</u>. De asemenea, întregul convertor a fost realizat într-o formă compactă, pe aceeași placă de circuit fiind construite toate componentele circuitului electronic de putere menționate anterior: partea de forță, controlul și traductoarele (figura II.1).



Fig. II.1. Circuitul electronic de putere, vedere din față (stânga) și verso (dreapta)

Au fost implementate trei metode de reglare: *Perturb&Observe*, o altă metodă testată și implementată constă în determinarea punctului de putere maximă prin metoda testării întregului domeniu de puncte de funcționare (*Sweep*), iar cea de-a treia metodă a fost *metoda conductanței incrementale*.

1.3. Stabilirea structurii simulatorului fizic de turbină eoliană

Componența finală a simulatorului electromecanic de turbină eoliană cuprinde următoarele echipamente: motor asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit (cu puterea nominală de 3 kW), convertizor de frecvență Danfoss VLT 5000 Flux (cu puterea nominală de 5 kW), encoder, generator sincron cu magneți permanenți GL-PMG-1500 (cu puterea nominală de 1500 W), convertor buck-boost cu funcție MPPT, baterii și un calculator de proces cu placă de achiziție DS1103 care rulează cu Matlab și ControlDesk. Având în vedere faptul că DS1103 se află pe conectorul ISA și tehnologia PC comercială a eliminat interfața ISA cu mult timp în urmă, placa de achiziție a fost montată într-o cutie DSpace PX4 conectată la o placă PCIExpress în PC printr-un cablu optic.

Au fost implementate trei soluții de control în vederea optimizării conversiei energiei eoliene. Buclele de control local folosite pentru determinarea punctului de putere maximă au fost realizate pe baza algoritmului *Perturb and Observe* și pe metoda *conductanței incrementale*. Aceste două metode au avantajul că nu mai necesită comandă externă, ci doar achiziția datelor pentru monitorizarea funcționării. O altă metodă implementată se bazează pe utilizarea unui regulator PI pentru controlul vitezei la arborele eolian. Această buclă are referința

$$\Omega_{opt} = \lambda_{opt} \frac{R}{v}$$
(II.1)

unde λ este viteza specifică, R - raza palei iar v viteza vântului.

Calculul parametrilor regulatorului PI s-a făcut prin identificarea procesului la aplicarea de treapte ale mărimii de comandă (factorul de umplere la chopper), considerându-se procesul de ordinul unu.

Pentru limitarea puterii în zona 3 s-a utilizat un sistem de reglare a puterii prin aducerea turbinei în *regimul de stall*, pe baza reducerii vitezei unghiulare atunci când crește viteza vântului. S-a asigurat și stabilitatea sistemului la trecerea din zona 2 (de optimizare a conversiei energiei eoliene în energie electrică) în zona 3 (de limitare a puterii). Soluția a constat în utilizarea unei zone intermediare, prin care se face optimizarea puterii, dar se păstrează viteza la arbore constantă.

Schema Simulink implementată pentru regulatoarele utilizate pentru controlul sistemului atât în zona 2 cât și zona 3, este reprezentată în figura II.2.



Fig. II.2. Schema Simulink a regulatoarelor utilizate pentru controlul conversiei energiei eoliene în energie electrică (optimizarea și limitarea puterii)

2. Realizarea și testarea sistemului de dezvoltare

2.1. Realizarea și testarea convertoarelor c.c-c.c. cu funcție de MPPT

Randamentul convertorului depinde de mai mulți factori: pierderile în conducție și în comutație, histerezis în miezurile magnetice, energia necesară convertorului pentru funcționare etc. Alegerea unui MOSFET este indicată atunci când RDS_ON combinat cu curentul de conducție generează o tensiune mai mică decât tensiunea de saturație a tranzistorului bipolar sau IGBT.

MOSFET-urile cu RDS_ON suficient de reduse pentru a fi utilizate în convertorul prezentat sunt disponibile numai cu tensiune drenă-sursă mică de 200V.

În aceste condiții, pentru convertorul boost s-au folosit MOSFET-uri IPP200N15N3 cu RDS_ON = 0.02Ω și VDS = 150 V, iar IGBT-urile IRG4PC40FU cu VCES = 600V și VCE_ON = 1.5V la IC = 27A au fost plasate în circuitul SEPIC.

<u>Circuitul a fost implementat în două variante, unul pentru sistemul de panouri fotovoltaice,</u> <u>pentru care a fost aleasă configurația boost și una pentru generatorul turbinei eoliene, cu</u> <u>configurație SEPIC. A fost utilizat același proiect al plăcii de circuite, cu diferențe doar pe</u> <u>componentele de putere utilizate.</u>

Sistemul de testare a fost monitorizat de la software-ul ControlDesk. Figura II.3 prezintă curbele de tensiune și curent în timpul unuia dintre experimente.



Fig. II.3. ControlDesk ecran pentru monitorizarea convertorului c.c.-c.c.

2.2. Realizarea și testarea emulatorului fotovoltaic

Testarea emulatorului fotovoltaic s-a realizat în două etape succesive ce au urmărit validarea structurii propuse pentru *chopperul boost*, a controlului MPPT și a structurii emulatorului în ansamblu.

Prima etapă a constat în testarea *convertorului boost* realizat în variantă modulară, cu tranzistoare IGBT și a controlului MPPT. În această etapă au fost făcute două seturi de teste, cu două surse de alimentare diferite: un sistem de 2 panouri fotovoltaice ENGOTEC W1200-125, respectiv un emulator de sursă fotovoltaică format din 5 surse de tensiune continuă. În **etapa a doua** testele s-au realizat pe structura finală a emulatorului. Partea *hardware* folosită pentru realizarea testelor include sursa programabilă, convertorul *boost* (varianta cu tranzistoare MOSFET) și sarcina compusă din bateria de acumulatori și o componentă rezistivă cu două trepte: 6Ω , 3Ω . Partea *software* a emulatorului are două componente: una care permite generarea curbelor caracteristice ale panoului fotovoltaic, furnizată de producătorul sursei programabile, și componenta de control a convertorului c.c.-c.c., care include algoritmul MPPT.

Pe lângă acestea, pentru achiziția mărimilor relevante au fost utilizate *datalogger*-ul sursei programabile și structura de achiziție a datelor aferentă standului dezvoltat în cadrul proiectului, formată din: placa de achiziție și control dSPACE DS1103, traductoare de curent și de tensiune, interfața *software* ControlDesk. Aceasta a permis compararea și validarea rezultatelor.

Pentru obținerea unei conversii optime a energiei, injectarea puterii în rețeaua locală de c.c. este controlată prin convertorul CC-CC comandat cu ajutorul algoritmului MPPT. În comparație cu utilizarea panourilor fotovoltaice reale, emulatorul aduce provocări suplimentare, cea mai importantă fiind dată de interacțiunea dintre bucla MPPT a convertorului și subsistemul de control al sursei programabile.

O primă observație este legată de timpul de răspuns. În general, pentru a avea ondulații de tensiune cât mai mici, la ieșirea surselor de tensiune programabile se găsesc condensatori electrolitici cu capacități mari și rezistoare de descărcare pentru a menține tensiunea de ieșire când sursa este în gol. Deși acest lucru este obișnuit pentru aplicațiile industriale, în cazul unui emulator fotovoltaic este necesar ca valorile acestor componente să fie mai mici, pentru a permite utilizarea unor algoritmi MPPT mai rapizi. Din acest motiv, pentru standul experimental a fost aleasă varianta HS a sursei. Avantajul este dat de timpul de răspuns de 8 ms și lățime de bandă de 45 Hz, față de 100 ms și 2 Hz lățime de bandă la varianta standard. Dezavantajul versiunii HS este creșterea ondulațiilor de tensiune la 1,4Vrms față de 40mVrms la versiunea fără HS.

Un al doilea aspect care merită menționat este tipul de control necesar, în funcție de tipul de sarcină conectat la rețeaua de c.c. Sursa programabilă/emulatorul PV poate lucra în două modalități de control – *control în curent* și *control în tensiune*. În figura II.4 se observă răspunsul emulatorului în cazul când sursa este setată pe modul control în curent. Eroarea de urmărire este de 1%.

Figura II.5 prezintă interfața ControlDesk folosită pentru afișarea datelor achiziționate cu ajutorul sistemului dSPACE. În plus, față de informațiile care pot fi obținute de la datalogger-ul sursei programabile, aici se poate vizualiza și evoluția principalelor mărimi de la nivelul convertorului, rețelei de c.c. și bateriei de acumulatori.



Nr. esantion Fig. II.4. Sarcina – rezistivă și acumulatori & control în curent – Puterea maximă (Pmax [W]) vs. puterea furnizată în rețea (Putere [W]) și eroarea de urmărire [%]



Fig. II.5. Sarcina rezistivă plus baterie de acumulatori, control în curent – Achiziția datelor folosind dSPACE DS1103 și ControlDesk

2.3. Realizarea și testarea simulatorului fizic de turbină eoliană

Au fost implementate trei metode de reglare: P&O; IC (conductanță incrementală) (ambele metode fiind cu control local) și o a treia metodă care constă în utilizarea regulatoarelor implementate software în Matlab/Simulink.

În figura II.6 <u>se prezintă rezultatele obținute pentru stabilitatea sistemului eolian la trecerea</u> <u>din zona 2 (de optimizare a conversiei energiei eoliene) în zona 3 (de limitare a puterii)</u>. S-a utilizat un profil pentru viteza vântului cu evoluție în rampă, cu limitare la 10 m/s. La momentul t=200 s ce conectează bucla de optimizare, comanda se duce la valoarea 2, viteza specifică (lambda) ajunge la valoarea optimală, $\lambda_{opt} = 7$, coeficientul de putere la valoarea maximă ($c_{pmax} = 0.476$), ceea ce înseamnă că viteza la arbore urmărește viteza optimală, așa cum se vede în figura II.6c), cât și din II.6), unde s-a reprezentat evoluția erorii buclei de optimizare. Din figura II.6d) se poate observa că la momentul t=420 secunde, se intră în zona de optimizare cu limitarea vitezei la arbore. Pentru această regiune, se continuă optimizarea conversiei energiei eoliene, puterea extrasă continuă să crească odată cu creșterea vitezei vântului. La momentul t=520 secunde, puterea atinge valoare 400 W, care a fost impusă ca putere nominală, iar bucla de limitare a puterii intră în acțiune, reușind să limiteze valoarea puterii, chiar dacă viteza vântului continuă să crească.





Fig. II.6. Evoluția principalelor mărimi ale simulatorului electromecanic de turbină eoliană, în cazul trecerii din zona 2 în zona de 3, funcționare pe baterie și sarcină rezistivă, cu profil de vânt în rampă

Limitarea puterii prin efectul de *stall* se poate observa și din evoluția coeficientului de putere (figura II.6f) și a vitezei specifice (figura II.6e), aceștia diminuându-și valorile.

De asemenea, s-a testat și funcționarea sistemului distribuit de mică putere în cazul în care cele două surse de energie regenerabilă debitează simultan, alimentând consumatori de curent alternativ în regim insular. Rezultatele obținute au evidențiat că în regim autonom de funcționare a sistemului distribuit de producere și utilizare a energiei electrice din surse regenerabile, nu se poate impune ca prioritate durata de viață a bateriei prin controlul regimului de încărcare/descărcare a bateriei, ci alimentarea consumatorilor. O soluție fiabilă poate consta în utilizarea unei surse de energie precum un grup electrogen (care să ofere continuitate în alimentare) sau racordarea la sistemul energetic național.

Objectiv III: Working/training visit

S-a participat la un training organizat de firma dSPACE în Germania, localitatea Paderborn, în perioada 12-13 septembrie 2017, de către membrul echipei proiectului, Vlad Ciprian. Trainingul

cu denumirea "ControlDesk Basic and Advanced" s-a desfășurat pe perioada a două zile și a avut ca obiect familiarizarea cu mediul informatic dedicat ControlDesk, pornind de la faptul că toată platforma de automatizare a sistemului distribuit de producere și utilizare a energiei electrice este bazată pe structuri dSPACE, care au ca interfață software pentru monitorizarea și controlul procesului mediul informatic ControlDesk.

Conținutul trainingului a vizat următoarele aspecte: Installation; Introduction to CDNG; CDNG Project Management; Instrumentation; Data Measurement; Data Recording; Data Set Handling; Bus Navigator; Calculated Variables; Advanced Measurement and Recording; Signal Editor; Tool Automation and Event Handling.

Obiectiv IV: Validarea în mediul fizic a structurii și algoritmilor de conducere a sistemului integrat de producere și utilizare a energiei electrice

1. Implementarea în mediul fizic a soluției de conducere ierarhizată a sistemului integrat

În cadrul acestei activități a proiectului a fost implementată soluția de conducere ierarhizată a sistemului integrat. Aceasta are două niveluri:

- la nivel inferior au fost implementate soluțiile de control aferente componentelor sistemului. Pentru sistemul eolian s-a implementat o soluție de control care asigură funcționarea pe curba care unește punctele de putere maximă (CRO) în zona 2 a caracteristicii de sarcină parțială, iar pentru limitarea puterii în zona 3 s-a implementat un sistem de reglare a puterii prin aducerea turbinei în *regimul stall*, pe baza reducerii vitezei unghiulare, atunci când crește viteza vântului. Pentru sistemul fotovoltaic s-a implementat o soluție de control care asigură extragerea puterii maximale. Pentru invertor/filtru activ de putere s-a implementat un sistem de control ce realizează regimul de invertor/redresor PWM, asigurând nivelul tensiunii la ieșire și cerințele de calitate a energiei impuse filtrului activ. Față de structura planificată în *raportul științific aferent etapei* 2016, în varianta finală a standului s-a optat pentru separarea căilor de conversie a energiei pentru încărcarea/descărcarea bateriei. Încărcarea bateriei de la rețea se face prin intermediul unui redresor autonom cu limitare de curent, iar transferul energiei de la baterie către consumatori sau rețea se face prin injectarea energiei electrice în partea de curent continuu a invertorului de tensiune folosit ca filtru activ.

Soluția finală de conducere la nivel inferior implementată în mediul fizic utilizează mediul informatic ControDesk/dSpace pentru sistemul eolian, celelalte elemente utilizând soluții software locale.

- la nivel superior au fost implementate două soluții de control pentru asigurarea celor două componente esențiale în managementul sistemului integrat: reducerea transferului energetic de la grid la rețeaua locală, respectiv asigurarea cerințelor pentru creșterea duratei de viață a bateriei.

Ținând cont de rezultatele din simulare, prima soluție de control constă în utilizarea unui regulator cu zonă de insensibilitate și histerezis, la care comanda din afara zonei de insensibilitate, pozitivă sau negativă, este proporțională cu eroarea de reglare. A doua soluție de control utilizează un regulator special, cu zonă de insensibilitate de tipul unui bloc tripozițional, realizat prin tehnici fuzzy. Spre deosebire de regulatorul tripozițional, comanda din afara zonei de insensibilitate, pozitivă sau negativă, este proporțională cu eroarea de reglare. La nivel superior soluțiile implementate utilizează mediul informatic ControlDesk, bazat pe plăci de achiziție dSpace DS1103. Structurile de control s-au implementat ca scheme Simulink, care se compilează și încarcă pe placa dSpace DS1103, în vederea rulării în timp real.

2. Testarea soluției de conducere ierarhizată a sistemului integrat utilizând diferite scenarii privind variabilele exogene aleatoare și stabilirea parametrilor finali ai structurii de conducere

În figura IV.1 sunt prezentate evoluțiile principalelor mărimi ale sistemului integrat de producere și utilizare a energiei electrice în cazul când debitează cele două surse de energie regenerabilă, iar bateria, rețeaua națională și consumatorii de curent alternativ monofazat sunt

conectați. Structura de control la nivel superior constă, în acest caz, în utilizarea unui regulator bipozițional cu histerezis.

În figura IV.1a) este reprezentat profilul de vânt din cadrul experimentului (un profil aleator cu valoarea viitezei medii de 5m/s). În figura IV.1b) sunt reprezentate cuplul eolian și cuplul electromagnetic. Din figurile IV.1c) și d) unde s-au reprezentat evoluțiile vitezei specifice și, respective, coeficientului de putere, se poate observa că reglarea conversiei energiei eoliene în energie electrică este maximă, viteza specific având variații mici în jurul valorii optimale (7), iar coeficientul de putere evoluând în același sens în jurul valorii maxime (0.476). Acest fapt poate fi demonstrate și din evoluția vitezei la arbore și a referinței buclei viteză unghiulară reprezentate în figura IV.1e). În figura IV.1f) s-au reprezentat tensiunea de intrare pe chopperul aferent emulatorului PV, tensiune de intrare pe chopperul aferent simulatorului electromecanic de turbină eoliană și tensiunea de pe bara de current continuu, unde debitează cele două surse regenerabile de energie, unde este conectată bateria și rețeaua națională, care în cazul în care sursele nu oferă necesarul de energie, poate ajuta la încărcarea bateriei și/sau alimentarea consumatorilor monofazați. Se observă că, la această viteză a vântului convertoarele aferente surselor regenerabile funcționează în regim de ridicător de tensiune, iar tensiunea pe baterie are variații în jurul valorii de 48V.





Fig. IV.1. Evoluția principalelor mărimi ale sistemului integrat de producere și utilizare a energiei electrice în cazul când debitează cele două surse de energie regenerabilă, este cuplată bateria, consumatorii de curent alternativ monofazat și rețeaua națională, cu regulator bipozițional cu histerezis

Tensiunea pe consumatorii monofazați este reprezentată în figura IV.1g), iar puterile celor două surse regenerabile și ale consumatorilor monofazați sunt reprezentate în figura IV.1h). Din figura IV.1j) se observă un rezultat de reglare bun atunci când referința de tensiune pe baterie a fost de 48V. Aceasta vine cu un cost asociat privind comutațiile dese de tip încărcare/descărcare ale comenzii, așa cum se poate observa în figura IV.1i).

În figura IV.2 sunt prezentate evoluțiile principalelor mărimi ale sistemului integrat de producere și utilizare a energiei electrice în cazul în care debitează cele două surse de energie regenerabilă, iar bateria, rețeaua națională și consumatorii de curent alternativ monofazat sunt conectați. Structura de control la nivel superior constă, în acest caz, în utilizarea unui regulator fuzzy. Evoluțiile mărimilor reprezentate sunt în sensul celor din figura precedentă. În figura IV.2a) s-a reprezentat profilul vitezei vântului, în b) cuplul eolian și cuplul electromagnetic, în c) viteza specific, în d) coeficientul de putere, iar în e) viteza la arbore și referința buclei de optimizare a conversiei energiei eoliene în energie electrică.





Fig. IV.2. Evoluția principalelor mărimi ale sistemului integrat de producere și utilizare a energiei electrice în cazul când debitează cele două surse de energie regenerabilă, este cuplată bateria, consumatorii de curent alternativ monofazat și rețeaua națională, cu regulator fuzzy

Evoluțiile tensiunii de la intrarea chopper-ului PV și la intrare chopper simulator eolian sunt reprezentate în figura IV.2f) împreună cu variația tensiunii pe bara de current continuu. În figura IV.2g) s-a reprezentat evoluția tensiunii de alimentare a consumatorilor monofazați iar în figura IV.2h) evoluțiile puterilor surselor și consumatorilor.

În cazul utilizării regulatorului fuzzy se observă în figura IV.2j) că reglarea tensiunii pe baterie se realizează la un nivel satisfăcător. Totuși, eroarea de reglare în acest caz este mai mare față de cazul anterior. În schimb, din figura IV.2i) se observă un număr mult mai mic de comutări ale comenzii de tip încărcare/descărcare a bateriei, ceea ce a fost conform cu scopul stabilit pentru nivelul superior de conducere ierarhizată a sistemului integrat. De altfel, considerăm că această soluție este net superioară conform cu criteriul mixt de evaluarea performanțelor unui sistem de producere și distribuție a energiei electrice.

Concluzii

Obiectivele asumate în anul 2017 au fost îndeplinite integral, **fiind realizate în proporție de 100% toate activitățile prevăzute în cadrul planului de realizare**. În cadrul etapei de derulare 2017 au fost obținute rezultatele prevăzute, după cum urmează:

1. Raport științific de etapă;

2. Convertor bidirecțional pentru transferulnenergiei înspre/dinspre rețea;

3. <u>Sistem de dezvoltare pentru conducerea sistemelor integrate de producere și utilizare a</u> <u>energiei electrice;</u>

4. <u>Structură și algoritmi de conducere a sistemului integrat.</u>

Diseminarea rezultatelor

Indicatorii realizați pentru activitatea de diseminare a rezultatelor sunt următorii:

1. 4 lucrări prezentate la conferințe BDI (IEEE Xplore) și în curs de indexare ISI Proceedings;

2. o teză de doctorat pentru care s-a obținut titlul de doctor, confirmat prin Ordinul ministrului educației naționale nr. 4097/20.06.2017.

Sistemul distribuit de producere și utilizare a energiei electrice în realizare fizică este reprezentat în continuare, iar elementele numerotate au semnificațiile următoare:

1- simulator electromecanic de turbină eoliană;

2- emulator de sistem fotovoltaic;

3- monitor și computer pentru nivelul superior de control;

4- monitor și computer pentru nivelul inferior de control;

5- invertor/filtru activ de putere;

6- baterie de acumulatori;

7- chopper aferent emulatorului fotovoltaic;

8- chopper aferent simulatorului electromecanic de turbină eoliană;

9- transformator trifazat pentru conectarea la rețeaua națională;

10- convertizor de frecvență Danfoss VLT 5000;

11- bara de curent continuu;

12- CP 1103 -1;

13- PX4 box-1;

14- CP 1103 -2;

15- PX4 box-2;

16- UPS;

17- consumator de curent alternativ pentru invertor/filtru;

18- circuite de distribuție, comandă și protecție;

19- consumatori de curent alternativ;

20- aparate de panou.



Realizarea fizică a standului destinat controlului ierarhizat inteligent al sistemelor distribuite de producere și utilizare a energiei electrice