

## **Rezumat al activităților derulate în anul 2015 în cadrul proiectului PN II–RU–TE–2014–4–1761: *Controlul Ierarhizat Inteligent al Sistemelor Distribuite de Producere și Utilizare a Energiei Electrice***

Pentru îndeplinirea obiectivului principal al acestei etape, cu denumirea: *Obținerea structurii sistemului integrat*, au fost derulate patru activități majore:

1. Modelarea matematică a variabilelor exogene aferente surselor și sarcinii locale și simularea numerică a acestora;
2. Modelarea matematică a surselor eoliană și PV, inclusiv a sistemelor de reglare aferente, și simularea numerică a acestora;
3. Modelarea matematică a structurii de conectare la rețea și control a calității energiei electrice;
4. Simularea numerică a întregului sistem integrat.

Sistemul **distribuit de producere și utilizare a energiei electrice** include două surse de energie electrică bazate pe conversia energiilor regenerabile: o sursă eoliană și o sursă PV. Variabilele exogene aferente acestor surse sunt: viteza vântului, intensitatea radiației solare și temperatura. Tot variabilă aleatoare nestaționară este și sarcina locală.

### **1. Modelarea matematică a variabilelor exogene aferente surselor și sarcinii locale și simularea numerică a acestora**

#### **1.1. Modelarea vitezei vântului**

Modelarea vitezei vântului ca proces aleator se poate face în raport cu două obiective:

1. evaluarea preliminară a potențialului energetic pe baza momentului de ordinul unu al vitezei vântului. Metodologia de determinare a energiei electrice produse din sursa eoliană include următoarele etape: determinarea, din date experimentale, a funcției de repartiție a vitezei vântului în situl analizat; determinarea densității medii a puterii vântului; calculul valorii optime și a valorii cea mai probabilă a vitezei vântului; calculul puterii medii extrase de turbina eoliană;
2. evaluarea preliminară a potențialului energetic pe baza momentului de ordinul doi al vitezei vântului. Această evaluare se referă la stabilirea proprietăților vitezei vântului ca **serie de timp**.

În cadrul prezentului proiect s-a considerat că potențialul energetic dedus pe baza momentului de ordinul unu al vitezei vântului este cunoscut și fundamentează utilizarea sursei eoliene de producere a energiei electrice. Ceea ce interesează în mod deosebit în cadrul proiectului sunt proprietățile procesului aleatoriu care reflectă **evoluția în timp a vitezei vântului**. Această evoluție determină schimbarea regimului de funcționare a sistemului propus de producere și utilizare a energiei electrice, care include: surse regenerabile (eoliană și PV), rețeaua electrică și o baterie.

În cadrul proiectului s-a considerat că viteza vântului este o variabilă aleatoare nestaționară, care poate fi prezentată sub forma:

$$v(t) = \bar{v}(t) + v_t(t) \tag{1}$$

unde  $\bar{v}(t)$  este componenta pe termen mediu și lung, iar  $v_t(t)$  componenta de turbulență. Componenta pe termen mediu și lung a fost modelată folosind un model spectral generic, derivat din spectrul Van der Hoven, iar turbulența pe pala turbinei s-a modelat astfel încât să fie obținută în doi pași: 1) se determină turbulența de punct fix (de anemometru), corespunzătoare poziției în care este plasată eoliana și 2) se calculează turbulența pe pala turbinei, transferând variabila precedentă printr-un filtru spațial și un filtru rotațional cu eșantionare. Proprietățile turbulenței depind de valoarea medie a vitezei vântului prin intermediul a doi parametri: *intensitatea turbulenței* și *lungimea de turbulență*. Acești parametri depind de viteza medie a vântului, de rugozitatea (roughness) solului și de înălțimea față de sol. Ei se calculează în conformitate cu diverse standarde

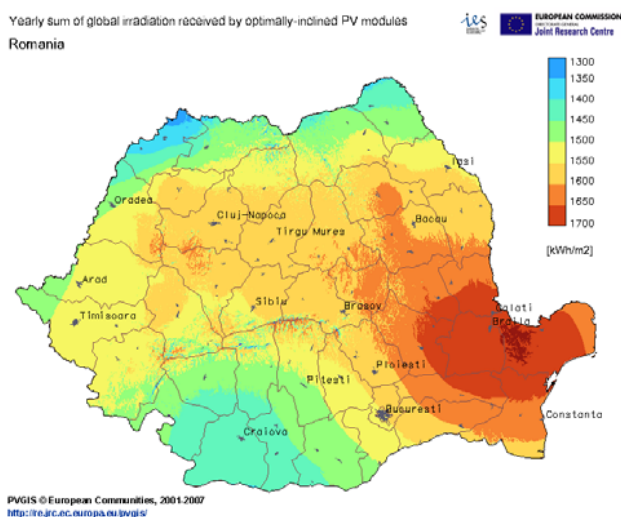
(ca de ex., IEC Standard, DS 472 Danish Standard etc).

## 1.2. Modelarea radiației solare și a temperaturii

Radiația solară reprezintă fluxul radiant solar recepționat de o unitate de arie. Radiația solară globală se compune din radiație directă și radiație difuză (datorată aerului atmosferic și norilor). Pe cer senin, radiația directă este maximă și cea difuză minimă, iar pe cer înnorat, invers. Radiația solară globală este diferită în funcție de ora zilei, radiația solară directă este diferită după orientarea suprafeței receptoare. Modelarea și măsurarea radiației solare terestre este importantă pentru evaluarea și implementarea de sisteme solare de energie regenerabilă. Radiația solară este una dintre sursele de energie regenerabilă cu evoluție predictibilă, atât pe termen scurt cât și pe termen lung. Predictibilitatea provine de la faptul că variația diurnă și cea anuală a radiației solare, cauzată de rotirea Pământului în jurul axei și în jurul Soarelui, poate fi precis descrisă matematic.

La nivelul terestru, valoarea intensității radiației solare incidentă unui panou solar nu este constantă, ci variază datorită multitudinilor de perturbații, precum:

- nebulozitatea atmosferică (nori și condiții locale de ceață) – care face ca radiația solară incidentă panourilor fotovoltaice să se reducă considerabil,
- temperatura aerului și gradul de poluare a aerului din zona respectivă – care, pentru valori ridicate, conduc la scăderea randamentului celulelor solare,
- coordonatele geografice (latitudine și longitudine),
- anotimp și ora din zi.



Având în vedere existența unor numeroase baze de date online care pot furniza informații *real time* cu privire la intensitatea radiației solare și a temperaturii, ambele date importante în funcționarea unui sistem fotovoltaic, în cazul validării preliminare a funcționării sistemului distribuit de producere și utilizare a energiei electrice se va folosi o evoluție a intensității radiației solare și a temperaturii, pentru zona Galați, disponibilă on line.

Distribuția spațială a radiației totale incidente la nivelul solului pentru România este prezentată în Figura alăturată.

## 1.3. Modelarea sarcinii locale

În scopul validării funcționării sistemului distribuit de producere și utilizare a energiei electrice s-au analizat două tipuri de consumatori: un consumator casnic monofazat alimentat dintr-o rețea trifazată de la Sistemul Electroenergetic Național (iar curba de sarcină, obținută prin măsurare, va fi folosită pentru predicția sarcinii pe o perioadă mare de timp); și mai mulți consumatori întâlniți în mod uzual în componența unui consumator casnic (care s-au modelat și simulat în mediul informatic Matlab, în scopul evidențierii aspectelor legate de calitatea energiei electrice și validării funcționării filtrului activ de putere). Din analiza prezentată se poate trage următoarea concluzie: toate echipamentele electrice analizate au demonstrat structură neliniară a sursei de alimentare prin conținutul important de armonici impare al curentului generat în rețea.

## 2. Modelarea matematică a surselor eoliană și PV, inclusiv a sistemelor de reglare aferente, și simularea numerică a acestora

### 2.1. Modelarea matematică și simularea sistemului de conversie a energiei eoliene

Pe caracteristica puterii dezvoltate de turbina eoliană în funcție de viteza vântului, pot fi

identificate patru zone de funcționare:

- zona 1, corespunzătoare vitezelor vântului inferioare vitezei de demaraj a turbinei. În această zonă turbina eoliană nu produce energie;
- zona 2, în care viteza vântului este cuprinsă între viteza de demaraj a turbinei și viteza nominală. Această zonă mai este cunoscută sub denumirea de *zona de sarcină parțială*, iar puterea extrasă este proporțională cu viteza vântului la cub;
- zona 3, cunoscută sub denumirea de *zona de sarcină maximă*, corespunde vitezelor vântului cuprinse între viteza nominală și viteza maximă de lucru. În această zonă puterea dezvoltată de turbina eoliană este menținută egală cu puterea nominală;
- zona 4, unde viteza vântului depășește viteza maximă admisă de turbina eoliană iar pentru protejarea părții mecanice și pentru evitarea distrugerii, aceasta este oprită din funcționare.

Soluțiile generale, care au fost abordate utilizează două regulatoare distincte pentru regimurile de sarcină parțială și sarcină totală. Schema de principiu care ilustrează structura buclelor de reglare a considerat că structura de reglare are următoarele atribute:

- comanda buclei de optimizare se face în funcție de viteza unghiulară la arbore (și nu în funcție de viteza vântului);
- reglarea puterii la valoarea nominală se face prin deplasarea punctului de funcționare, în planul caracteristicii regimurilor optime;
- calculul referinței de putere a buclei de optimizare se face printr-o relație dedusă prin regresie polinomială.

Totodată, s-a arătat că pentru a se evita comportarea instabilă a sistemului și pentru o tranziție netedă a variabilelor de stare la comutarea între regiunile de sarcină parțială și de sarcină totală, în cadrul soluției propuse s-a considerat o zonă intermediară în regimul de sarcină parțială. În această zonă intermediară, viteza unghiulară este menținută constantă, la o referință impusă prin limita de saturație a comenzii regulatorului de putere. Regimul de sarcină parțială va fi format din două zone: zona 2a, în care sistemul eolian este menținut pe CRO, și zona notată cu 2b, de viteză unghiulară constantă, în timp ce regimului de sarcină totală îi va corespunde zona 3.

Validarea acestor strategii de conducere automată s-a realizat cu ajutorul mediului informatic Matlab Simulink și SimPowerSystems.

## **2.2. Modelarea și simularea sistemului fotovoltaic**

Deoarece punctul de funcționare cu putere maximă depinde atât de radiația incidentă cât și de temperatură, funcționarea panoului cu randament maxim nu se poate realiza decât cu ajutorul unui circuit electronic care să găsească și să urmărească acest punct de funcționare.

Obținerea cantității maxime de energie de la panourile solare implică:

- utilizarea unui sistem de poziționare mobil, încât razele solare să cadă tot timpul perpendicular pe panourile solare;
- utilizarea unui circuit electronic de interfață între panouri și elementele de stocare/utilizare a energiei astfel încât în orice moment de timp panourile să funcționeze cu eficiență maximă.

Prima cerință nu este eficiență financiar pentru sistemele fotovoltaice de putere mică. A doua cerință se poate aplica oriunde, deoarece există convertoare electrice cu eficiență mare (>95%) care permit urmărirea punctului de funcționare de putere maximă (MPPT). În literatura de specialitate sunt prezentate numeroase medii de simulare pentru sistemele fotovoltaice. Sunt prezentate structuri de control clasice pentru realizarea funcției MPPT și se bazează ori pe perturbarea punctului curent de funcționare, ori pe estimarea matematică în funcție de parametri tehnici ai panoului solar, temperatură și radiație solară. Pentru implementarea funcției MPPT s-au testat doi algoritmi clasici, „perturb & observe” și „conductanță incrementală” cărora li s-au adus îmbunătățiri proprii.

### 2.3. Modelarea și simularea convertorului DC/DC bidirecțional pentru conectarea acumulatorilor cu filtrul activ

Platforma propusă a fi realizată acumulează energie electrică de la sursele regenerabile (soare, vânt) într-un grup de acumulatori de 48V și 200Ah. Utilizarea energiei din acumulatori pentru alimentarea consumatorilor conectați la rețea de tensiune trifazată implică:

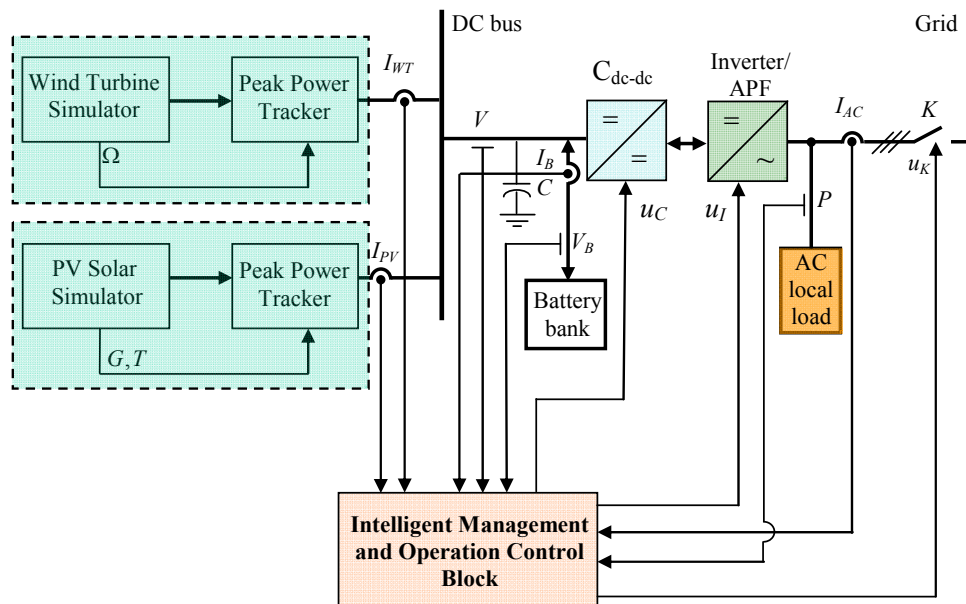
- circuit ridicător de tensiune, cu 48V la intrare și cel puțin 300V la ieșire;
- izolare galvanică între intrare și ieșire, întrucât platforma funcționează cu conectare la rețea;
- distribuirea energiei din acumulatori pe una, două sau trei faze ale rețelei de consumatori în funcție de cum sunt conectați aceștia pe fiecare fază.

Deoarece filtrul activ trifazat este conectat în paralel cu consumatorii, iar algoritmul de control al filtrului permite transferul energiei din/către orice direcție între rețea, consumatori și condensatorul de tensiune continuă al filtrului activ de putere, se va utiliza filtrul activ pentru a transfera energia din acumulatori către consumatori sau rețea. Avantajele imediate sunt:

- la funcționarea ca filtru activ, surplusul de energie, provenit de la acumulatori, se va distribui automat către consumatori indiferent de modul de amplasare al acestora pe cele trei faze ale rețelei;
- la funcționarea ca inverter de tensiune, filtrul este deja conectat în paralel cu consumatorii de pe cele 3 faze iar structura hardware îi permite să alimenteze consumatorii cu energia disponibilă în condensatorul de tensiune continuă.

De interes deosebit este și posibilitatea de a încărca acumulatorii cu energie de la rețea, pentru situația în care sursele regenerabile nu sunt disponibile. Utilizarea unui circuit autonom de încărcare a bateriei conectat la rețea este posibilă însă adaugă complexitate în managementul ciclurilor de încărcare-descărcare ale bateriei.

### 3. Modelarea matematică a structurii de conectare la rețea și control a calității energiei electrice în mediul informatic Matlab/Simulink/SimPowerSystems



**Figura 1.** Schema bloc simplificată a sistemului propus

Principalul obiectiv al proiectului îl reprezintă conceperea, testarea preliminară în regim de simulare și apoi validarea experimentală, prin realizare fizică, a unui sistem distribuit de producere (cu surse eoliene și PV) și utilizare a energiei electrice, de mică putere (până în 5 kW). Schema de principiu a sistemului este reprezentată în Figura 1.

Blocul Inverter/APF, în cadrul lucrării de față, se definește ca fiind un echipament electric având două roluri în structura propusă:

1. Filtru activ de putere (APF);
2. Invertor (Inverter).

APF – are rolul de a asigura nivelul indicatorilor de calitate a energiei electrice tranzitate prin punctul de conexiune comună (PCC), poate realiza un transfer energetic bidirecțional, către și de la rețeaua națională.

Inverter – are rolul de a asigura alimentarea consumatorilor locali pe baza energiei disponibile în baterie și sursele regenerabile, în situația în care rețeaua națională nu este conectată (sau nu este disponibilă/funcțională).

Deoarece majoritatea consumatorilor casnici de energie electrică sunt de tip monofazat (cu alimentare între fază și nul) chiar și într-o locuință conectată la rețeaua trifazată, rezultă faptul că în punctul de conectare ansamblul consumatorilor este unul trifazat, asimetric, cu amplitudini și distorsiuni armonice diferite pentru curenții de pe fiecare fază. Acest lucru conduce implicit la existența unui curent semnificativ prin conductorul de nul, curent încărcat cu toate armonicile generate de consumatorii neliniari monofazați.

Pentru a reduce factorul de distorsiuni armonice (THD) al curenților de rețea, pentru a simetriza consumul de la rețea și pentru a anula curentul prin conductorul de nul este nevoie de un filtru activ trifazat cu 4 brațe. Din analiza soluțiilor de implementare, există posibilitatea ca al 4-lea braț să fie de tip pasiv, realizat prin divizarea în două părți egale a condensatorului de tensiune continuă din filtru, sau de tip activ, realizat cu comutatoare statice asemenea celorlalte 3 brațe active. Divizorul capacitiv se poate utiliza pentru cazul în care sarcina electrică compensată de filtrul activ este formată din echipamente trifazate și simetrice (mașini electrice, transformatoare, redresoare trifazate etc).

Specificul consumatorilor din rețeaua considerată în proiect impune utilizarea filtrului cu 4 brațe active, deoarece asimetria consumatorilor ar dezechilibra rapid tensiunile de la bornele celor 2 condensatoare înseriate în brațul pasiv, ceea ce ar conduce cel puțin la funcționarea eronată a filtrului activ.

#### **4. Simularea numerică a întregului sistem integrat**

Pentru simularea întregului sistem integrat, s-au conectat în același model Simulink blocurile testate în cadrul activităților anterioare. Deoarece calculele matematice necesare simulării întregului sistem pentru o perioadă suficientă de timp (minute/ore/zile) depășesc puterea de calcul disponibilă în proiect, s-a ales să se păstreze elementele esențiale fiecărui bloc funcțional în parte, eliminând orice componentă ne-esențială funcționării sistemului. Pasul de eșantionare a fost de asemenea crescut de 10 ori, astfel că formele de undă corespunzătoare semnalelor rapid variabile conțin erori mai mari.

#### **5. Concluzii**

Rezultatele obținute din simularea, în mediul informatic Matlab/Simulink, elementelor componente ale sistemului distribuit de producere și utilizare a energiei electrice analizat în cadrul prezentului proiect sunt concludente în vederea proiectării soluției de conducere automată și realizare fizică, aferente etapei următoare din planul de realizare.

A fost validată, prin simulare numerică, funcționarea surselor de conversie a energiei regenerabile (eoliană și PV) în energie electrică, inclusiv a sistemelor de reglare aferente, convertorul DC/DC bidirecțional, care asigură transferul energiei spre/dispre filtru, respectiv baterie. A fost validată, prin simulare numerică, funcționarea filtrului activ de putere guvernat prin strategia de control indirect. Din rezultatele obținute s-a arătat că acesta asigură rejectarea perturbațiilor și respectarea cerințelor de calitate a energiei electrice.

Totodată, s-a analizat și funcționarea sistemului în regim autonom, caz în care blocul Inverter/AFP are rol de invertor de tensiune.