

PROGRAM PNII - PARTENERIATE

COD PROIECT: PN-II-PT-PCCA-2013-4-1743

NR. CONTRACT FINANȚARE: 41/2014

TITLU PROIECT: *Turbină eoliană hibridă cu ax vertical*

RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC (RST)

ETAPA DE EXECUȚIE NR. I/2014

**TITLU ETAPĂ: *Analiză de soluții constructive fezabile
de componente pentru TEH cu ax vertical***

CUPRINS

1. OBIECTIVUL GENERAL AL PROIECTULUI.....	3
2. OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUȚIE.....	3
3. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUȚIE.....	3
4. DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ	4
5. REZULTATE OBȚINUTE ÎN CADRUL ETAPEI CURENTE	18
6. CONCLUZII.....	19
7. BIBLIOGRAFIE	19

1. OBIECTIVUL GENERAL AL PROIECTULUI

Obiectivul general al proiectului HYWINDT constă în studiul, proiectarea, realizarea experimentală și monitorizarea unui model funcțional de Generator Eolian Hibrid (GEH) echipat cu sistem de gestiune a energiei electrice și termice, destinat Turbinelor Eoliene Hibride (TEH) cu ax vertical. Puterea totală utilă anvizată a sistemului de conversie (putere electrică și termică) este de 3 kW.

2. OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUȚIE

Obiectivele specifice *Etapei I de execuție* a proiectului HYWINDT sunt următoarele:

- studii privind soluțiile constructive fezabile de componente pentru sisteme eoliene hibride cu ax vertical (rotoare, generatoare electrice, generatoare hibride, structuri de conversie energetică și comandă, structuri de convertoare electronice etc.);
- elaborarea documentației necesare în vederea protecției proprietății intelectuale asupra elementelor inovatoare și depunerea acesteia la OSIM;
- studii privind alegerea variantei constructive a generatorului eolian hibrid;
- diseminarea rezultatelor de cercetare.

3. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUȚIE

Prima fază de execuție a proiectului HYWINDT a vizat analiza de soluții constructive fezabile de componente pentru TEH cu ax vertical, pregătirea documentației pentru brevetarea conceptelor inovative, respectiv analize privind alegerea variantei constructive a GEH.

Activitatea I.1. Analiză de soluții constructive fezabile de componente pentru TEH cu ax vertical. Cercetările efectuate au avut ca obiectiv analiza de soluții constructive de componente ce pot fi utilizate pentru TEH cu ax vertical. S-au identificat mai multe soluții constructive posibile de turbine cu ax vertical, diferite tipuri inovatoare de generatoare eoliene hibride (s-au identificat 3 soluții constructive pentru care s-au depus 3 cereri de brevet de invenție la OSIM), diferite topologii de convertoare electronice pentru sisteme eoliene cu conectare la rețea sau pentru sisteme eoliene utilizate pentru stocarea energiei, etc.

Activitatea I.2. Elaborarea documentației necesare în vederea protecției intelectuale a elementelor și conceptelor brevetabile. O atenție particulară a fost acordată elaborării documentației necesare protecției proprietății intelectuale asupra elementelor inovative. În urma activității de cercetare efectuate au rezultat 3 cereri de brevet de invenție depuse la OSIM pe data de 10.11.2014. Cercetările efectuate s-au concretizat de asemenea prin elaborarea unei lucrări științifice trimisă în formă preliminară, spre publicare, la conferința internațională *Conference on Power Electronics and Applications, EPE'15-ECCE Europe, Geneva, Switzerland*, care se va desfășura în perioada 8-10 Sept. 2015.

Activitatea I.3. Analize privind alegerea variantei constructive de GEH. Ultima activitate executată în cadrul primei etape a proiectului HYWINDT este reprezentată de studii în vederea alegerii variantei constructive a GEH. În urma analizei efectuate asupra celor 3 soluții constructive de GEH propuse, s-a identificat soluția optimă ce răspunde cel mai bine unui număr de criterii impuse precum: fiabilitate, simplitate constructivă, costuri minime, robustețe.

4. DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ

4.1. Introducere

Între sistemele de exploatare și conversie în electricitate a surselor regenerabile de energie un loc important este ocupat de sistemele eoliene. Acestea permit conversia energiei cinetice a maselor de aer în mișcare (uzual) în energie electrică.

În comparație cu sistemele fotovoltaice, principalul competitor pe piața sistemelor de producere de energie electrică din surse regenerabile, sistemele eoliene au avantajul unei factor de încărcare mai mare care poate ajunge în regiunile cu bun potențial energo-eolian la 35 % pe când cele fotovoltaice în general nu depășesc 15 % în România. Sistemele fotovoltaice, în special cele fixe, fără sistem de urmărire a discului solar, sunt mai fiabile decât cele eoliene, mai predictibile (de ex. noaptea radiația solară este practic nulă) și mai puțin fluctuante. În cazul sistemelor fotovoltaice o reducere de două ori a intensității radiației solare determină o reducere aproximativ proporțională a puterii electrice produse pe când o reducere a vitezei vântului de două ori determină o reducere de circa 8 ori a energiei produse de turbinele eoliene. În plus, energia produsă de centralele fotovoltaice nu depinde foarte mult de locul de amplasare a acestora pe teritoriul României, pe când locația de instalare a unui parc eolian poate avea o influență majoră asupra cantității de energie anuale furnizate (și deci asupra rentabilității investiției) întrucât există diferențe majore în ceea ce privește potențialul energo-eolian între diferite regiuni ale țării noastre.

Sistemele eoliene au avantajul unui spațiu ocupat la sol mult mai restrâns în comparație cu cele fotovoltaice. Terenul pe care sunt amplasate turbinele eoliene poate fi utilizat fără probleme în scop agricol, pe când cel ocupat de panourile fotovoltaice este aproape inutilizabil.

Din punct de vedere al mediului, turbinele eoliene pot crea probleme anumitor specii de păsări migratoare, pe când cele fotovoltaice nu ridică probleme de această natură.

Datorită producției de masă prețul sistemelor fotovoltaice *per kW instalat* a scăzut foarte mult în ultimii ani, fiind în momentul de față comparabil cu cel al sistemelor eoliene. Scăderea prețului panourilor fotovoltaice în ultimii 6 ani este de-a dreptul impresionantă, prețul per kW scăzând de circa 6 ori, până la circa 500 Euro/kW [1]. Evident la costul panourilor fotovoltaice trebuie adăugate și alte costuri specifice sistemelor fotovoltaice (invertor, conectori, cabluri, protecții, instalare etc.).

Pentru păstrarea competitivității sistemelor de conversie eoliană se depun eforturi considerabile în ceea ce privește: reducerea costurilor, creșterea randamentului conversiei, a fiabilității, etc.

4.2. Sisteme eoliene cu ax vertical

Turbinele eoliene de mică și medie putere se construiesc frecvent în două variante constructive principale: cu ax orizontal, respectiv cu ax vertical.

Turbinele cu ax orizontal sunt mai utilizate prezentând numeroase avantaje precum: eficiență energetică ridicată, permite accesul la vânturi puternice atunci când turnul de susținere este înalt, control turbinei este mai simplu etc. În plus coeficientul de putere C_p este în general mai ridicat la turbinele cu ax orizontal decât la cele cu ax vertical.

Turbinele cu ax vertical sunt mai eficiente în mediul urban, respectiv sub acțiunea vânturilor turbulente. Aceste turbine prezintă în plus avantaje în ceea ce privește costurile de mentenanță, întrucât generatorul electric și partea electronică se află aproape de sol și sunt mai ușor de întreținut.

De asemenea acest tip de turbină ar putea fi mai ușor integrat în peisajul ambiant fără a deranja foarte mult din punct de vedere vizual, aspect deosebit de important, în special în vecinătatea cartierelor rezidențiale. În plus turbinele eoliene cu ax vertical nu necesită sistem de orientare după direcția vântului ca în cazul celor cu ax orizontal de puteri medii și mari (cele de puteri mici sunt de regulă echipate cu sistem pasiv de orientare).

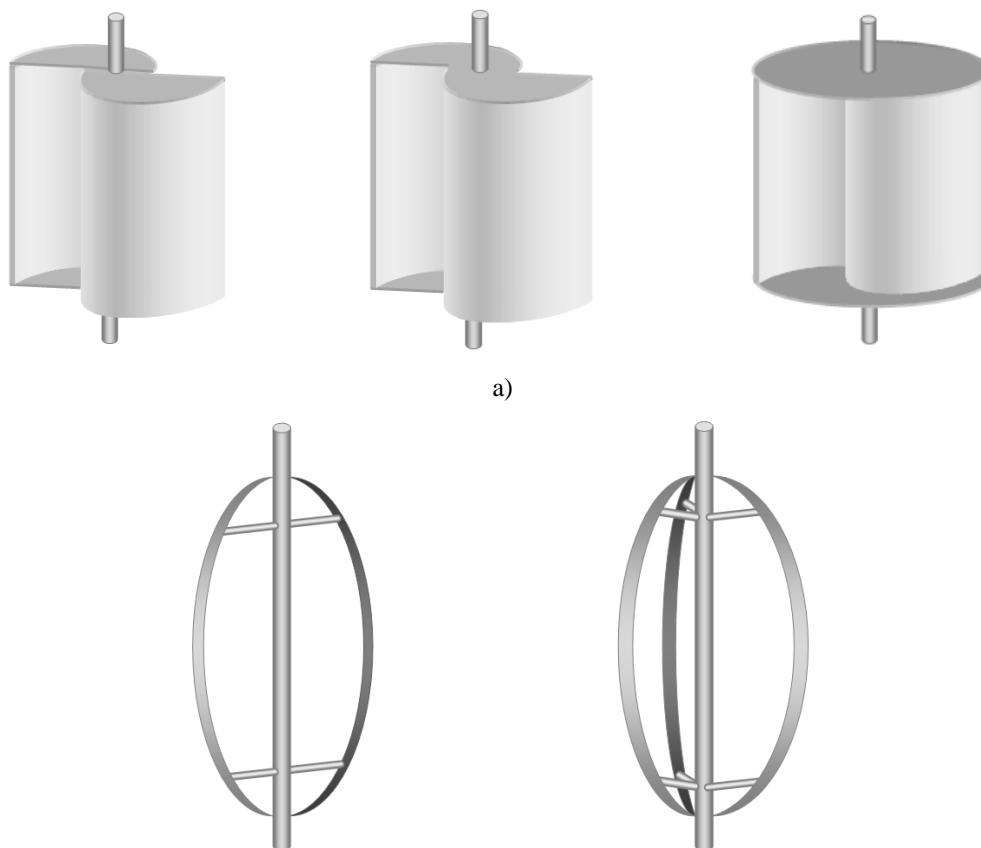
Pe de altă parte solicitările mecanice fiind practic diferite pe palele rotorului, partea mecanică a turbinei cu ax vertical trebuie proiectată și executată cu grijă, pentru a putea face față eforturilor și vibrațiilor specifice ce pot afecta durata de viață a sistemului.

Turbinele eoliene clasice cu ax vertical se compun din 3 elemente constructive principale: *rotorul turbinei*, *turnul de susținere* și *nacela* care adăpostește componentele cheie ale sistemului eolian (o parte a axului turbinei, multiplicatorul de turație dacă e cazul, generatorul electric, sistemul electronic de comandă și control, etc.). În cazul turbinelor cu ax vertical nacela este situată de regulă la baza sistemului eolian. Anumite turbine eoliene cu ax vertical sunt ancorate suplimentar pentru a rezista la furtuni sau vânturi puternice.

4.2.1. Rotoare pentru turbine cu ax vertical

Cele mai utilizate tipuri constructive de rotoare eoliene cu ax vertical sunt cele în construcție Savonius, respectiv Darrieus (normală, în formă de H sau elicoidale), Fig. 1.

Principiul de funcționare al unui sistem eolian presupune în mod uzual conversia în prima etapă a *energiei cinetice a vântului* în *energie mecanică de rotație*, urmată de conversia acesteia în *energie electrică* cu adaptarea parametrilor specifici la cerințele impuse. Sistemul poate fi conectat la o rețea locală de consumatori, la sistemul electroenergetic național, la un sistem de baterii ce trebuie încărcate etc. Sistemele eoliene pot funcționa la *viteză variabilă* sau la *viteză constantă* reglată electronic.



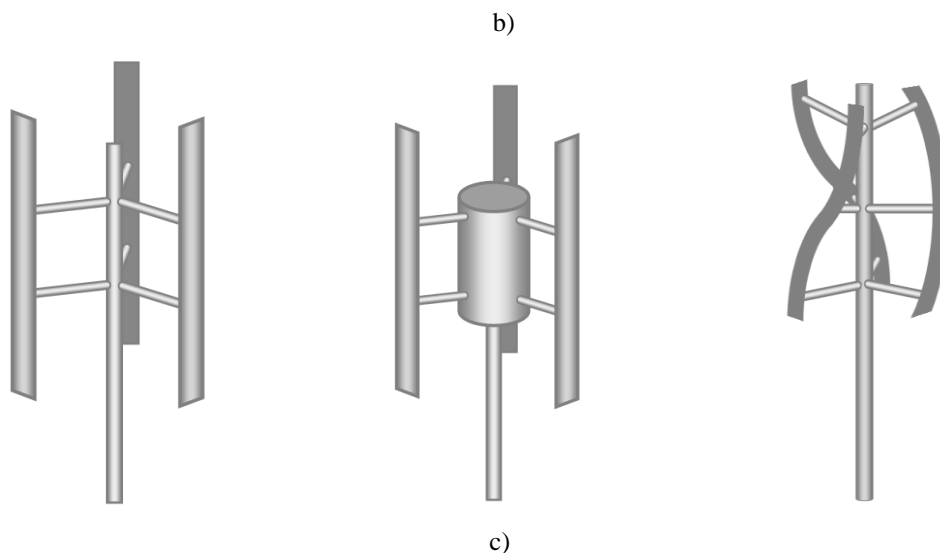


Fig. 1. Exemple de soluții constructive de turbine eoliene cu ax vertical; a) Turbine Savonius; b) Turbine Darrieus; c) Turbine Darrieus tip H și tip elicoidal.

4.2.2. Generatoare electrice pentru turbine cu ax vertical

Generatoarele electrice uzuale folosite în sistemele eoliene sunt: de tip *sincron cu excitație electromagnetică* (*Wound Rotor Synchronous Generator - WRSG*) sau cu *magneți permanenți* (*Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG*), respectiv de tip *asincron cu rotor în scurtcircuit* (*Squirrel Cage Induction Generator - SCIG*) sau cu *rotor bobinat* (*Wound Rotor Induction Generator*). *Generatoarele asincrone cu rotor bobinat* pot fi cu *rezistență rotorică variabilă controlată* sau cu *dublă alimentare* (*Doubly Fed Induction Generator - DFIG*).

Sistemele eoliene de mică putere sunt echipate de regulă cu PMSG sau cu SCIG. PMSG au avantajul unui randament superior în raport cu cele asincrone și pot funcționa la un factor de putere mai ridicat, însă SCIG sunt mai fiabile și mai ieftine.

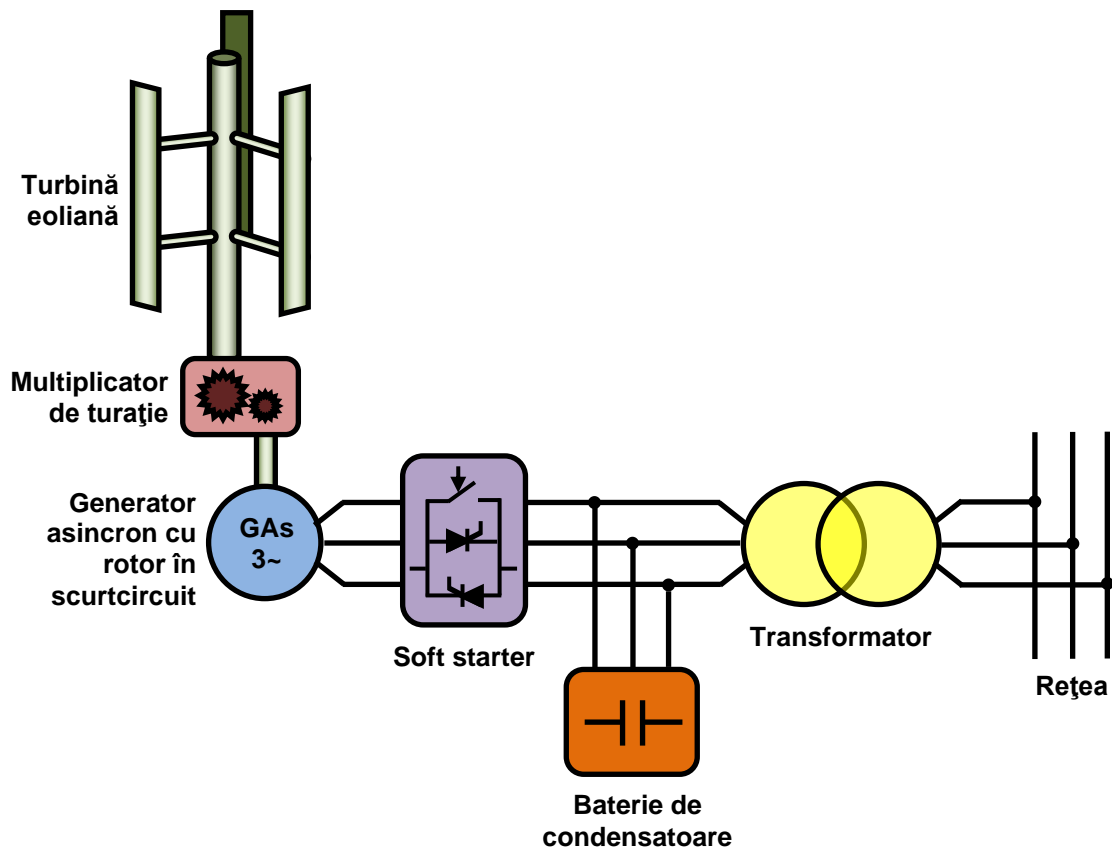
SCIG pot funcționa *conectate direct la rețea* prin intermediul unui soft-starter în cazul *sistemelor eoliene cu viteză constantă* sau *conectate la rețea prin intermediul unui convertor electronic de tip redresor - inverter* în cazul *sistemelor eoliene cu viteză variabilă*.

Generatoarele sincrone integrate în sistemele eoliene sunt în general *cuplate la rețea prin intermediul unor convertoare electronice de tip redresor - inverter*.

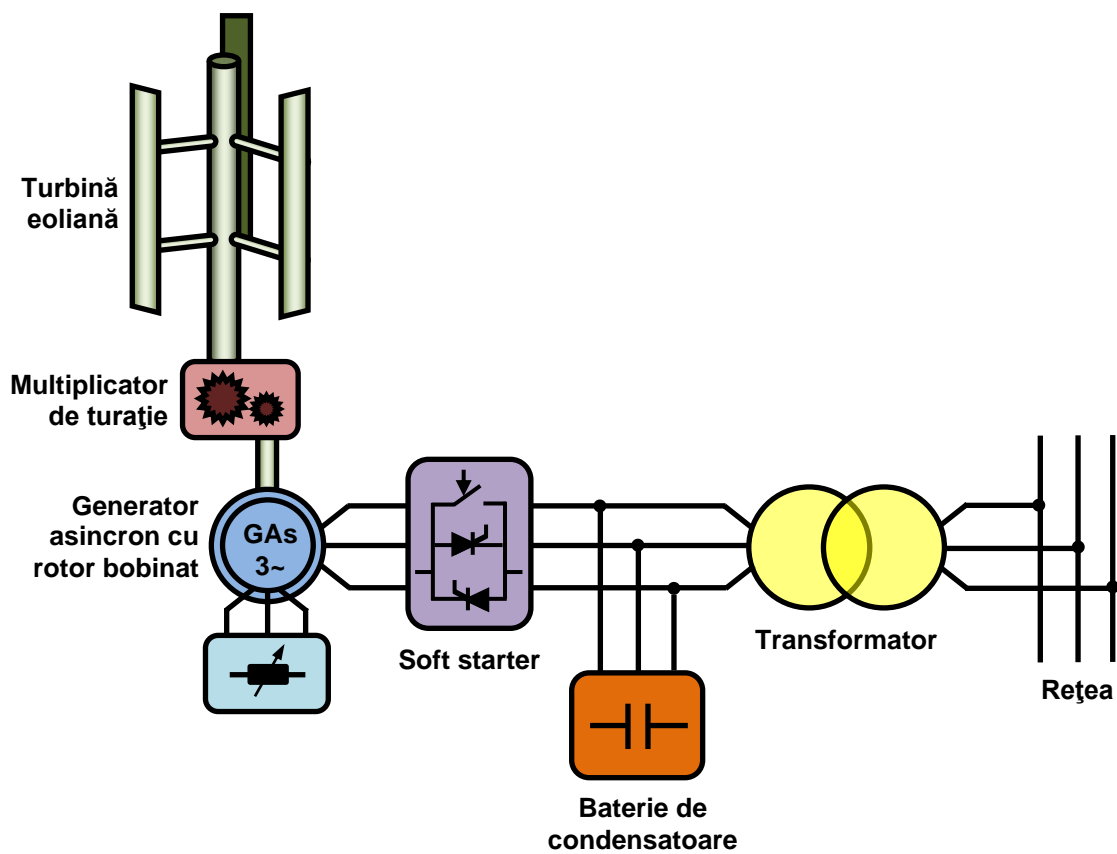
Sistemele eoliene funcționează și în regim izolat, neracordate la sistemul electroenergetic național. Deoarece viteza vântului este puternic fluctuantă, stabilitatea rețelei locale în ceea ce privește tensiunea și frecvența este asigurată de regulă prin alte mijloace precum: sisteme hidro, grupuri electrogene, turbine cu gaz, baterii, pile de combustie, biomasă, etc.

4.2.3. Structuri de conversie energetică pentru turbine cu ax vertical

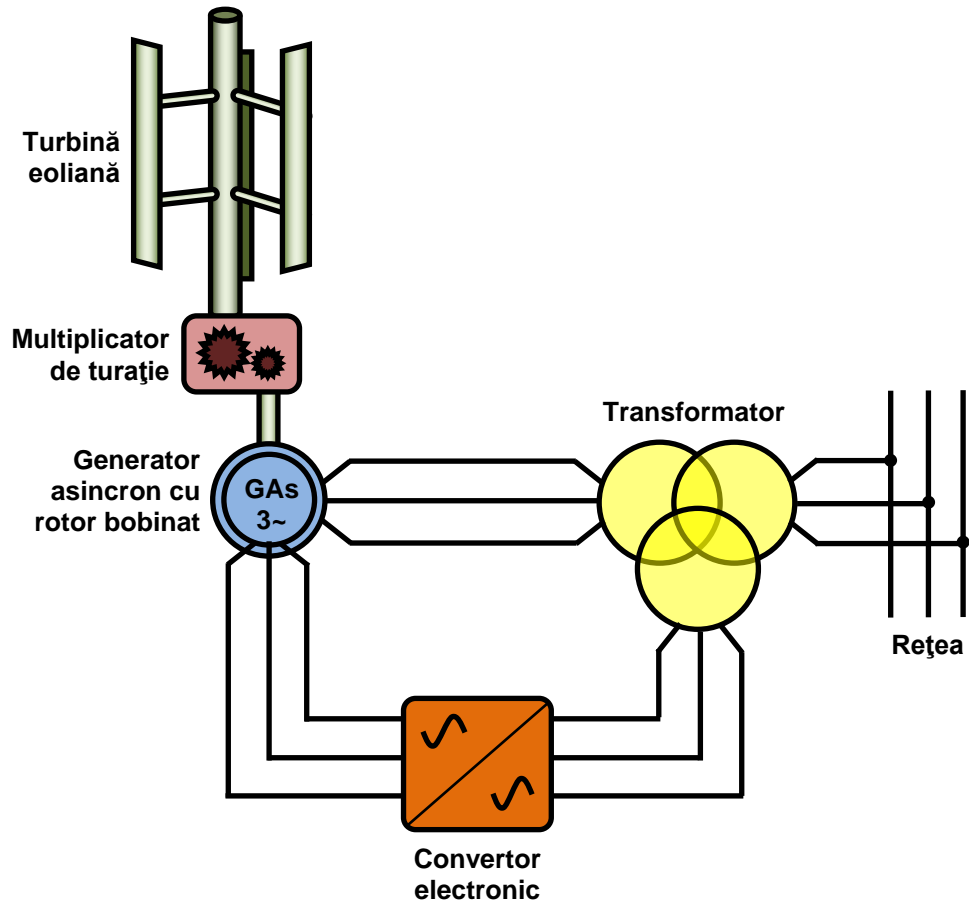
În Fig. 2 de mai jos sunt prezentate exemple de soluții fezabile de structuri de conversie a energiei eoliene în electricitate, utilizând turbine cu ax vertical, echipate cu diferite tipuri de generatoare electrice [2].



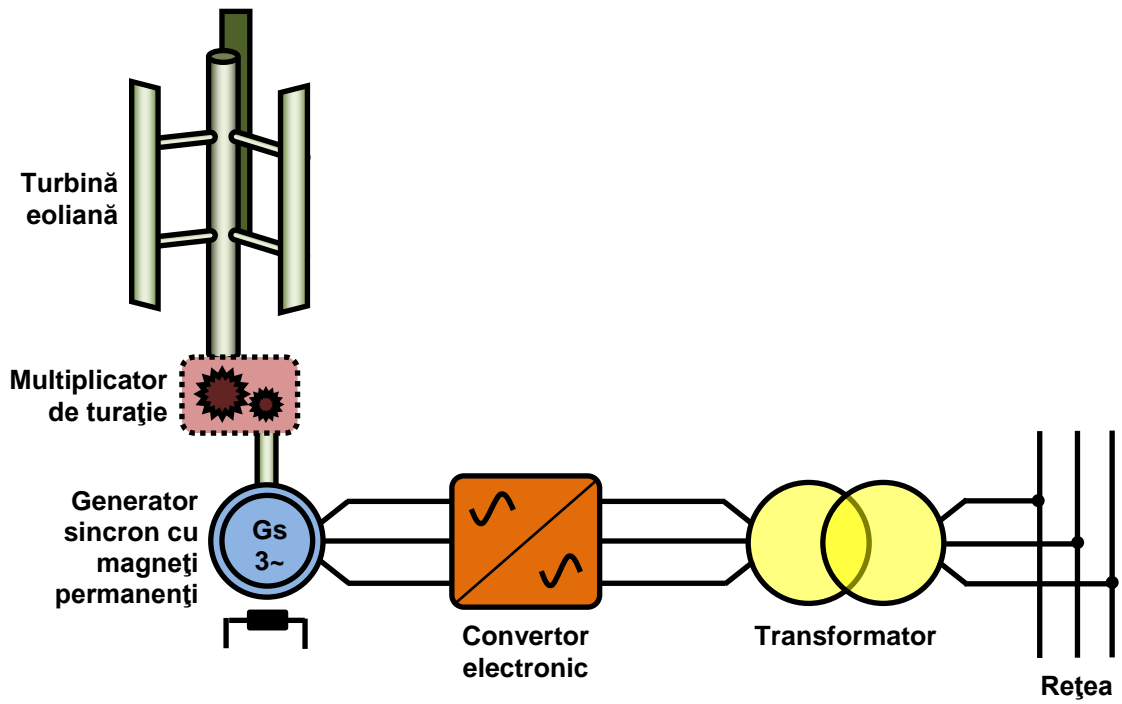
a)



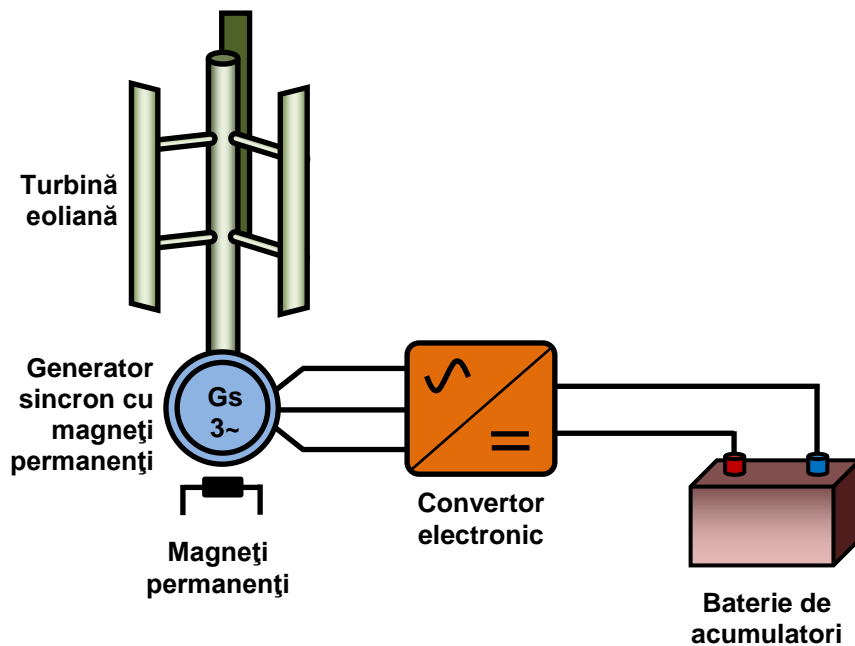
b)



c)



d)



e)

Fig. 2. Sisteme eoliene cu ax vertical. Soluții tehnice posibile; a) sistem eolian echipat cu generator asincron cu rotor în scurt-circuit, multiplicator de turație și soft-starter; b) sistem eolian echipat cu generator asincron cu rotor bobinat și rezistență variabilă, multiplicator de turație și soft-starter; c) sistem eolian echipat cu generator asincron cu dublă alimentare și multiplicator de turație; d) sistem eolian echipat cu generator sincron cu magneți permanenți, cu sau fără multiplicator de turație; e) sistem eolian echipat cu generator sincron cu magneți permanenți, fără multiplicator de turație, cu sistem de încărcare de baterii.

Topologia convertoarelor electronice utilizate în cadrul sistemelor de conversie eoliană depinde în primul rând de destinația acestora. Astfel distingem două tipuri principale de convertoare electronice pentru sisteme eoliene și anume: *convertoare electronice pentru sisteme eoliene conectate la rețea*, respectiv *convertoare electronice pentru stocarea energiei (ex. baterii, supercondensatoare)*.

Ținând cont de faptul că generatoarele electrice utilizate în construcția sistemelor eoliene sunt de curent alternativ, convertoarele electronice pentru *sistemele eoliene conectate la rețea* presupun o conversie de tip ac - dc - ac incluzând de regulă un *redresor de putere*, un *convertor dc - dc ridicător (boost converter)* și un *invertor de putere pentru sincronizare cu rețeaua*. Deoarece în multe cazuri sistemele eoliene injectează putere electrică în rețeaua de medie tensiune, între invertor și rețea se interpune în mod uzual un transformator ridicător ce crește tensiunea invertorului până la valoarea impusă de rețea. Pentru furnizarea energiei reactive se utilizează deseori o baterie de condensatoare, iar pentru a asigura calitatea energiei injectate în rețea se folosesc sisteme de filtrare.

Sistemele eoliene utilizate pentru stocarea energiei utilizează convertoare electronice de tip ac - dc incluzând de regulă un *redresor de putere*, un *convertor dc - dc (boost converter)* și un *controler de stocare a energiei*.

În cazul sistemelor eoliene de mare putere echipate cu PMSG, cea mai utilizată soluție de convertor electronic are la bază două convertoare de tensiune cu două niveluri (2L) într-o configurație *back-to-back* [3]. La puteri mai mici sunt posibile și alte soluții, cum ar fi o punte cu diode conectată în cascadă cu un convertor dc-dc ridicător (*boost converter*). Pentru aplicații de puteri mai mari, utilizarea convertoarelor cu mai multe niveluri de tensiune prezintă, în ultimii ani, un interes din ce în ce mai mare [4].

A. Soluții de convertoare de putere 2L unidirecționale.

O tendință evidentă în ultimii ani presupune utilizarea convertoarelor de putere dimensionate pentru puterea nominală PMSG. Aceste generatoare nu necesită putere reactivă, iar puterea activă circulă unidirecțional prin convertorul de putere dinspre PMSG spre rețea. Ca urmare, un simplu redresor cu diode poate fi conectat pe partea cu generatorul sincron pentru a obține o soluție eficientă din punctul de vedere al costurilor. Totuși, chiar și redresoarele cu diode cu 12 sau mai multe pulsuri introduc armonici de frecvențe joase, care pot induce fenomene de rezonanță la nivelul axului. Un alt dezavantaj este reprezentat de reducerea puterii utile a PMSG, ca urmare a creșterii pierderilor datorită prezenței armonicilor. Redresorul de putere poate fi necomandat (Fig. 3) sau semicomandat.

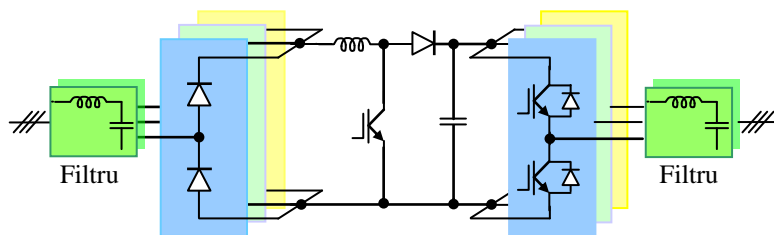


Fig. 3. Convertor 2L unidirecțional - sursă de tensiune pentru PMSG.

Pentru a permite funcționarea la viteză variabilă și tensiune continuă constantă se introduce un convertor dc-dc *boost* (Fig. 3). În cazul utilizării DFIG, tensiunea continuă poate fi reglată prin excitația rotorului. Se menționează că pentru niveluri de putere de ordinul MW, convertorul dc-dc se poate realiza prin conectarea în paralel a mai multor celule elementare de comutație de tip N. Această conexiune utilizează unul sau mai multe inductoare cuplate magnetic și permite creșterea frecvenței aparente de comutație, fapt care conduce la reducerea valorii, a volumului și a prețului de cost pentru inductanța serie. O altă variantă constă în utilizarea unei soluții de conversie dc-dc *boost* cu trei niveluri de tensiune. Specific soluției cu DFIG este puterea convertorului electronic redusă la aproximativ 30% din puterea nominală a generatorului. În cazul utilizării PMSG, convertorul static de putere se dimensionează pentru puterea nominală a generatorului.

În Fig. 4 se prezintă utilizarea a două convertoare - surse de curent într-o configurație *back-to-back* [5]. Avantajul acestei soluții constă în exploatarea inductanțelor cablurilor lungi folosite în parcurile eoliene atunci când distribuția se face în curent continuu.

Folosirea invertoarelor - surse de tensiune pe partea rețelei sunt soluții adoptate în cazul când stocarea este capacitivă (Fig. 3). În cazul unei stocări inductive se recomandă pe partea rețelei utilizarea unor invertoare - surse de curent (Fig. 4).

B. Convertoare de putere cu două niveluri de tensiune

Convertorul sursă de tensiune (VSC - Voltage Source Converter) cu două niveluri de tensiune (2L) comandat pe principiul modulației pulsurilor în lățime (Pulse Width Modulation - PWM) este cea mai utilizată topologie în sistemele eoliene. În domeniul conversiei 2L există atât cunoștințe teoretice, cât și tehnologie pentru implementare. Soluția 2L-PWM-VSC se utilizează ca interfață între generator și rețea în configurație *back-to-back* (Fig. 5), iar pe partea cu rețeaua se conectează un transformator.

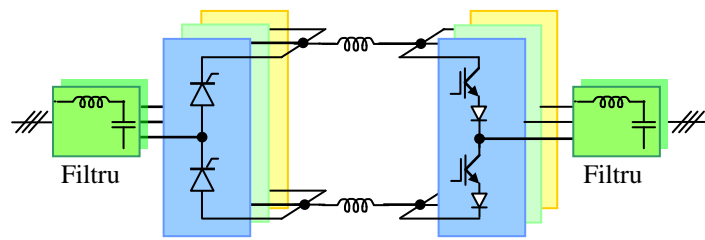


Fig. 4. Convertor unidirecțional- sursă de curent pentru PMSG.

Un avantaj tehnic al soluției 2L-VSC constă în simplitatea structurii și a numărului redus de dispozitive, ceea ce îi conferă robustețe și fiabilitate. Totuși, domeniul puterilor și a tensiunilor turbinelor eoliene este în creștere, iar structura 2L-VSC poate prezenta pierderi mari în comutație și eficiență redusă la puteri de ordinul MW și tensiuni medii (Medium Voltage - MV). De asemenea, dispozitivele semiconductoare de putere necesită o conectare în paralel sau o conectare în serie pentru a obține puterea și tensiunea turbinei eoliene, ceea ce ar conduce la reducerea robusteții și a fiabilității convertorului de putere.

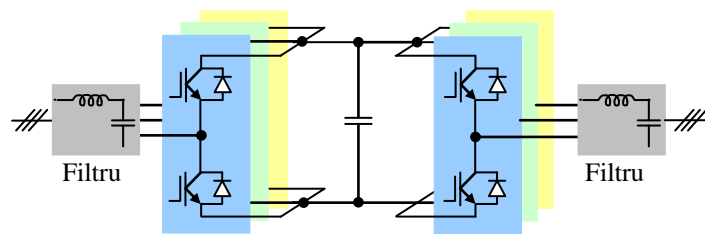


Fig. 5. Convertor 2L-PWM-VSC *back-to-back* pentru PMSG.

O altă problemă a soluției 2L-VSC constă în obținerea la ieșire a unei tensiuni cu numai două niveluri. Aceasta conduce la solicitări dv/dt mari atât în generator, cât și în transformator. Pentru a limita gradientul de tensiune și a reduce factorul total de distorsiuni armonice (Total Harmonic Distortion - THD), filtrele de ieșire sunt mari, voluminoase și scumpe.

Structura 2L-VSC este recomandată pentru turbinele eoliene echipate cu DFIG însă ea este utilizată și pentru turbinele eoliene echipate cu SCIG.

C. Convertoare de putere multinivel

Puterea turbinelor eoliene este în continuă creștere. Pe măsură ce puterea crește soluția clasică 2L-VSC este din ce în ce mai dificil de utilizat cu dispozitivele semiconductoare de putere disponibile pe piață pentru a obține performanțe acceptabile. Structurile de conversie multinivel prezintă mai multe niveluri de tensiune la ieșire, amplitudine mare a tensiunii și putere mare de ieșire. În ultimii ani, acestea au devenit cele mai interesante soluții pentru sistemele eoliene [6].

În general, convertoarele multinivel pot fi clasificate în patru categorii [7]: structura cu punct neutru fixat (NPC - Neutral-Point-Clamped), structura cu condensatoare intermediare (Flying-Capacitor - FC), structura cu inductoare cuplate magnetic (Coupled-Inductor - CI) și structura în cascadă.

Structura NPC cu trei niveluri de tensiune (3L) este una dintre cele mai comercializate convertoare de pe piață. Similar cu topologia 2L-PWM-VSC și convertorul de putere 3L-NPC este configurat *back-to-back* (Fig. 6) în cazul PMSG. Acesta realizează un nivel suplimentar de tensiune și solicitări dv/dt mai mici decât topologia 2L. Ca urmare, filtrele sunt mai mici. Prin utilizarea unor întreruptoare statice de putere cu aceeași capacitate în tensiune, convertorul 3L-NPC este capabil

să dubleze amplitudinea tensiunii la ieșire în comparație cu structura clasică 2L. Totuși, cercetări recente au arătat că pierderile totale în dispozitivele semiconductoare de putere sunt repartizate neuniform între întreruptoarele exterioare și cele interioare [8]. Acest dezavantaj conduce la reducerea puterii maxime de ieșire și/sau la reducerea frecvenței maxime de comutație.

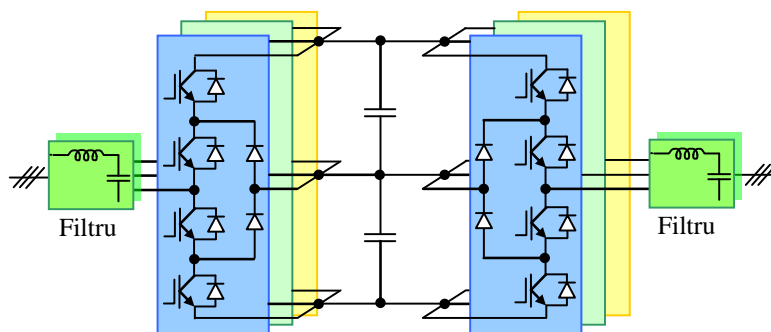


Fig. 6. Convertor 3L-NPC-VSC *back-to-back* pentru PMSG.

Pentru a compensa acest dezavantaj și deci, pentru o mai bună uniformizarea a pierderilor totale în întreruptoare, au fost introduse noi grade de libertate sub forma unor dispozitive semiconductoare de putere active (3L-Active NPC-VSC), Fig. 7. Datorită acestora a fost posibilă dezvoltarea unei noi strategii de comandă PWM cu stări de comutație redundante [9], care a condus la o frecvență aparentă de comutație de două ori mai mare decât frecvența de comutație și la o echilibrare mai bună a pierderilor totale în dispozitivele semiconductoare de putere. Odată cu creșterea frecvenței aparente de comutație s-a optimizat și dimensionarea filtrelor.

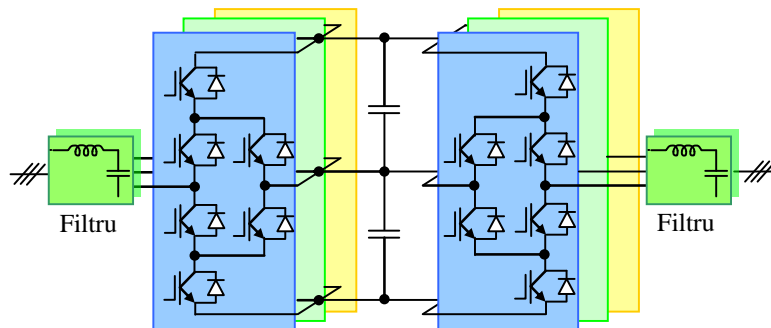


Fig. 7. Convertor 3L-ANPC-VSC *back-to-back* pentru PMSG.

Convertorul 3L-FC este o topologie cu trei niveluri de tensiune care se bazează pe existența unor surse de tensiune continuă intermediare [7]. Aceste surse sunt materializate în practică sub forma unor condensatoare, denumite și condensatoare intermediare sau flotante (Flying Capacitor - FC). Topologia poate fi generalizată pentru N niveluri de tensiune prin conectarea în serie a $(N-1)$ celule de comutație ($N \geq 3$). Sursele intermediare se conectează între celulele de comutație. Pe măsură ce numărul celulelor înseriate crește, solicitările dv/dt sunt din ce în ce mai reduse și frecvența aparentă de comutație crește. Prin condensatoarele intermediare circulă curentul de sarcină, un aspect important în dimensionarea lor. Tensiunea la bornele FC este o fracțiune din tensiunea de alimentare, fapt care conduce la reducerea atât a energiei stocate, cât și a tensiunii comutate de dispozitivele semiconductoare de putere.

Asemănător cu celelalte structuri multinivel și acest convertor este configurat *back-to-back* (Fig. 8) în cazul PMSG. Echilibrarea tensiunilor la bornele surselor intermediare se face prin intermediul comenzii și cu ajutorul unor filtre suplimentare, acordate pe frecvența de comutație.

Pentru o mai bună dimensionare a FC se preferă comenzile PWM cu funcționare discontinuă (DPWM- Discontinuous PWM), cu discontinuități de câte 60° electrice.

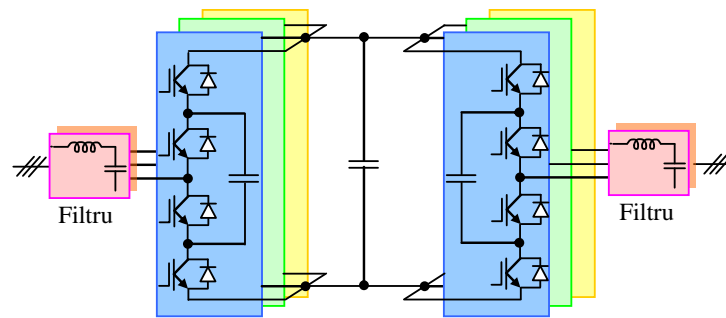


Fig. 8. Convertor 3L-FC-VSC *back-to-back* pentru PMSG.

Acest concept multinivel a fost îmbunătățit prin suprapunerea a două etaje FC, noul concept fiind denumit *Stacked-Flying-Capacitors* (SFC). Convertorul SFC permite reducerea tensiunii la bornele FC, reducând astfel atât energia stocată în FC, cât și volumul acestora. În funcție de conceptele multinivel care au participat la obținerea SFC, există mai multe tehnologii de realizare, fiecare cu avantajele și dezavantajele ei. Una dintre acestea are la bază utilizarea principiului NPC și a conceptului de conversie unidirecțional *Vienna Rectifier*, fiind prezentată pentru prima dată pentru cazul bidirecțional generalizat cu N niveluri de tensiune ($N \geq 3$) în [10].

Recent, structura redresorului unidirecțional *Vienna* cu trei niveluri de tensiune (3L) a fost propusă pentru conectarea pe partea PMSG [11]-[12], fiind o soluție de conversie mai eficientă și mai ieftină decât convertorul 2L-PWM-VSC.

Redresorul PWM trifazat 3L-*Vienna* conține câte un singur întreruptor static de putere activ pe fiecare fază, fiind este cea mai populară structură ac-dc unidirecțională. Fiecare braț este compus din două etaje în cascadă, care comută același curent de linie, dar la frecvențe diferite.

Pe baza analizei efectuate, în Fig. 9 se propune o variantă nouă de sistem eficient, în configurație *back-to-back*, care combină avantajele structurilor prezentate mai sus (3L-*Vienna* și 3L-ANPC).

În literatură există două variante diferite de redresoare unidirecționale *Vienna*, publicate pentru prima dată în [13] și [14]. Pentru creșterea eficienței convertoarelor electronice soluția [13] a stat la baza mai multor dezvoltări recente. O parte dintre aceste studii au fost publicate în [15], altele sunt în curs de publicare. Dintre studiile aflate în curs de publicare se află și lucrarea [16] propusă de membrii echipei la o conferință de prestigiu din Europa.

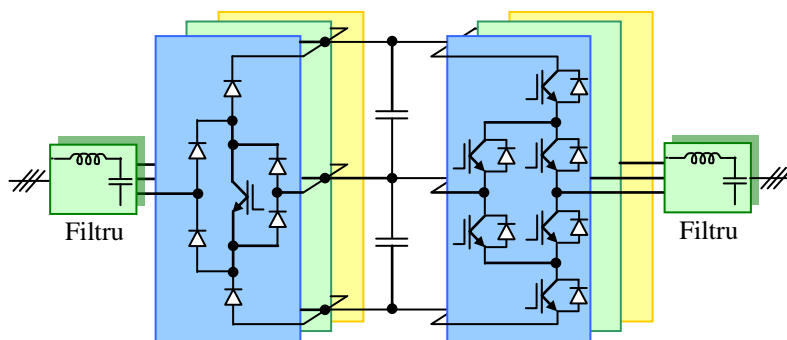


Fig. 9. Sistem eficient în configurație *back-to-back* propus pentru PMSG.

D. Soluții de convertoare electronice dc-dc utilizate pentru stocarea energiei

În general, convertoarele electronice dc-dc utilizate pentru stocarea energiei sunt bidirecționale în curent și unidirecționale în tensiune. Acestea pot fi cu 2L sau multinivel.

Un exemplu de convertor *dc-dc* 2L utilizat pentru stocarea energiei electrice este prezentat în Fig. 10 (a). Acesta este alcătuit din două întreruptoare bidirecționale în curent și unidirecționale în tensiune, care primesc o comandă PWM complementară. Întreruptoarele au o bornă comună care se conectează spre un inductor sau o sursă de curent. Celelalte borne ale întreruptoarelor sunt conectate spre o sursă de tensiune continuă.

Structura clasică 2L prezintă două regimuri de funcționare, unul de tip ridicător (*boost*) și altul de tip coborâtor (*buck*). Selecția regimului de funcționare depinde de modul de stocare sau recuperare a energiei. Principalul avantaj este simplitatea, ceea ce conduce la costuri de realizare mici. Dezavantajele soluției derivă din faptul că este o configurație cu două niveluri de tensiune.

O posibilitate de creștere a performanțelor constă în conectarea celulelor de comutație în paralel prin intermediul unor inductanțele cuplate magnetic (InterCell Transformers - ICT), Fig. 10(b) sau fără cuplaj magnetic. În acest mod frecvența aparentă de comutație este un multiplu al frecvenței de comutație și ondulațiile curentului sunt reduse proporțional cu numărul celulelor conectate în paralel. Curentul care circulă prin întreruptoarele de putere este o fracțiune din curentul total și astfel, pierderile totale sunt mai mici decât în cazul configurației clasice.

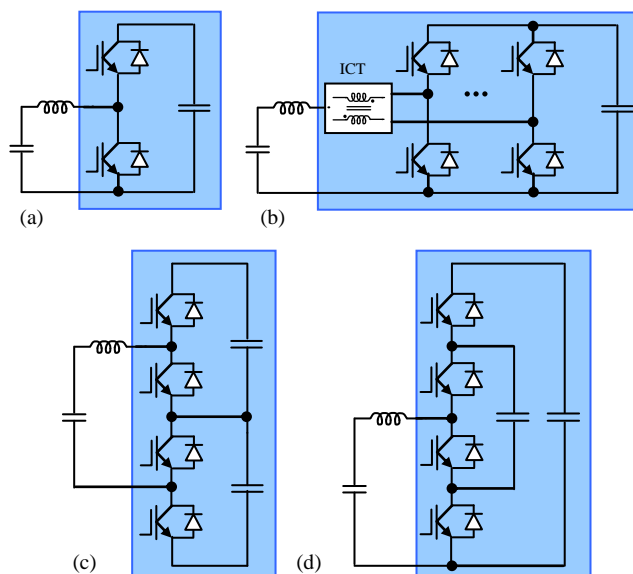


Fig. 10. Convertore electronice dc-dc utilizate pentru stocarea capacitivă.

Pentru a reduce tensiunea comutată de dispozitivele semiconductoare se poate utiliza una dintre structurile prezentate în Fig. 10 (c) și (d). Ambele configurații permit obținerea unei frecvențe aparente de comutație egală cu de două ori frecvența de comutație. În cazul topologiei din Fig. 10(c) există două surse secundare de tensiune continuă, în timp ce structura FC prezentată în Fig. 10 (d) dispune doar de o sursă de tensiune continuă.

4.3. Sisteme eoliene hibride cu ax vertical propuse în cadrul proiectului HYWINDT

Sistemele eoliene hibride cu ax vertical propuse spre analiză în cadrul proiectului HYWINDT, spre deosebire de cele clasice, permit conversia energiei eoliene simultan în electricitate și în

energie termică, permițând obținerea unor randamente superioare ale conversiei energetice, reducerea costurilor, respectiv scăderea dimensiunilor de gabarit ale generatorului eolian.

Conversia energiei în cazul sistemelor eoliene hibride este asigurată prin intermediul unui *Generator Eolian Hibrid* (GEH) care furnizează energie electrică întocmai ca un generator electric de tip sincron trifazat, respectiv energie termică, Fig. 11.

GEH este alcătuit din două părți principale, un *Generator cu Magneți Permanenți* (GMP) și un *Sistem de Încălzire cu Magneți Permanenți* (SIMP), formând împreună un dispozitiv de conversie a energiei eoliene în construcție compactă și caracterizat de o eficiență energetică ridicată, Fig. 12. Cele două componente GMP și SIMP au un rotor comun (armătură mobilă) echipat cu *Magneți Permanenți* (MP). Statorul GMP este unul clasic, similar cu cel al unui generator sincron. Statorul SIMP este alcătuit dintr-o serpentină parcursă de lichid (agent termic) care are două tronsoane. *Primul tronson al serpentinei* (*Serpentina 1* în Fig. 12) se află în contact cu miezul statoric al GMP, fiind folosit pentru răcirea acestuia, prin preluarea de către agentul termic a unei părți importante a pierderilor dezvoltate în mașină (pierderi Joule, respectiv pierderi în fier). *Cel de-al doilea tronson al serpentinei* (*Serpentina 2* în Fig. 12) permite încălzirea suplimentară a agentului termic lichid prin efectul Joule al curenților turbionari induși în pereții serpentinei SIMP de către câmpul magnetic învârtitor produs de MP rotorici.

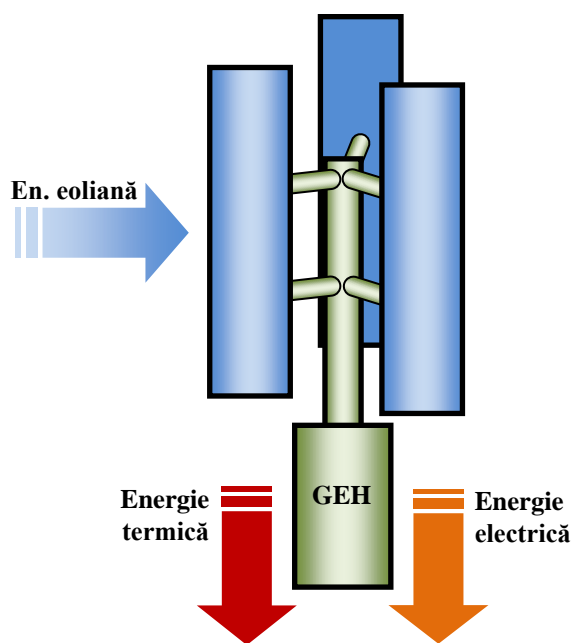
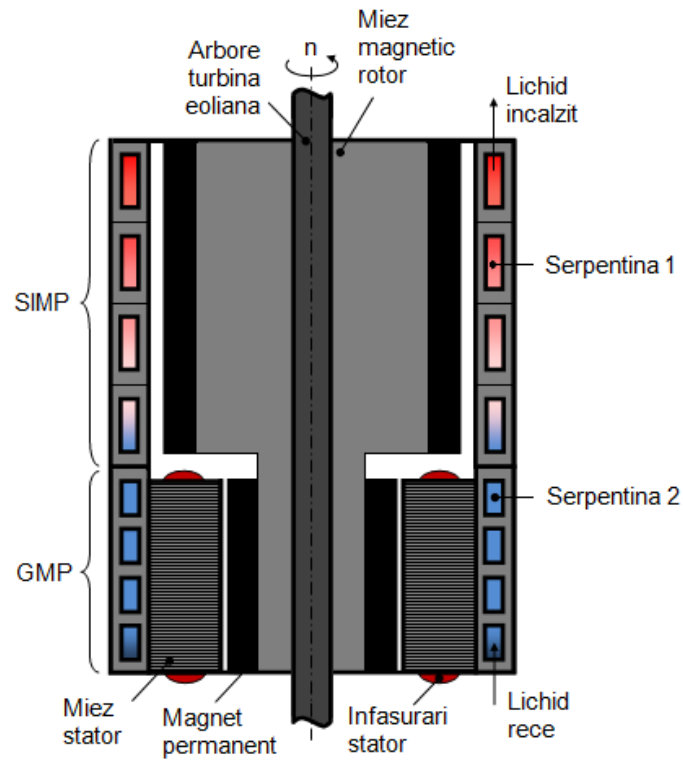


Fig. 11. Principiul de funcționare al unui sistem eolian cu ax vertical echipat cu Generator Eolian Hibrid (GEH).

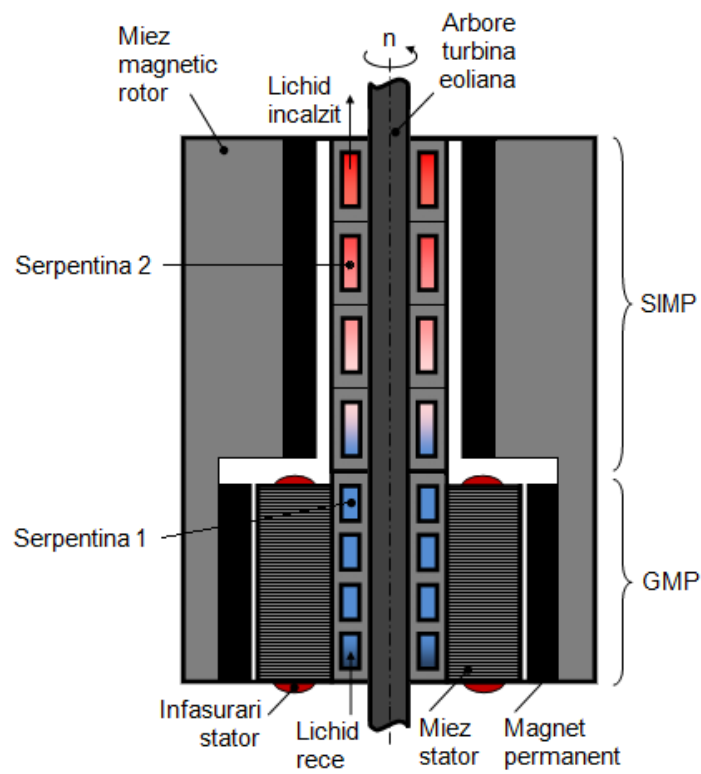
În comparație cu PMSG clasice, un GMP echipat cu circuit de răcire poate fi mai compact întrucât poate funcționa la densități de curent mult mai mari. Prin evacuarea prin convecție forțată a căldurii disipate în GMP se asigură protecția sistemului de izolație electrică a mașinii, respectiv protecția MP (aceștia putând fi demagnetizați dacă se încălzesc excesiv), elemente esențiale ce determină durata de viață și fiabilitatea echipamentului. Temperatura agentului termic lichid aflată în stare fierbinte la ieșirea din GEH trebuie corelată cu debitul său și păstrată în limite acceptabile prin intermediul unui *sistem de gestiune a energiei*, Fig. 13. Parametrii energiei electrice produse de GMP vor fi reglați cu ajutorul aceluiași sistem de gestiune a energiei (electrice și termice), energia electrică generată fiind injectată în rețea.

Trei variante constructive de GEH pot fi avute în vedere în cadrul proiectului, acestea fiind prezentate schematic în Fig. 12 în secțiune axială:

- GEH cu flux magnetic radial și rotor interior, Fig. 12 (a);
- GEH cu flux magnetic radial și rotor exterior, Fig. 12 (b);
- GEH cu flux magnetic axial, Fig. 12 (c).



a)



b)

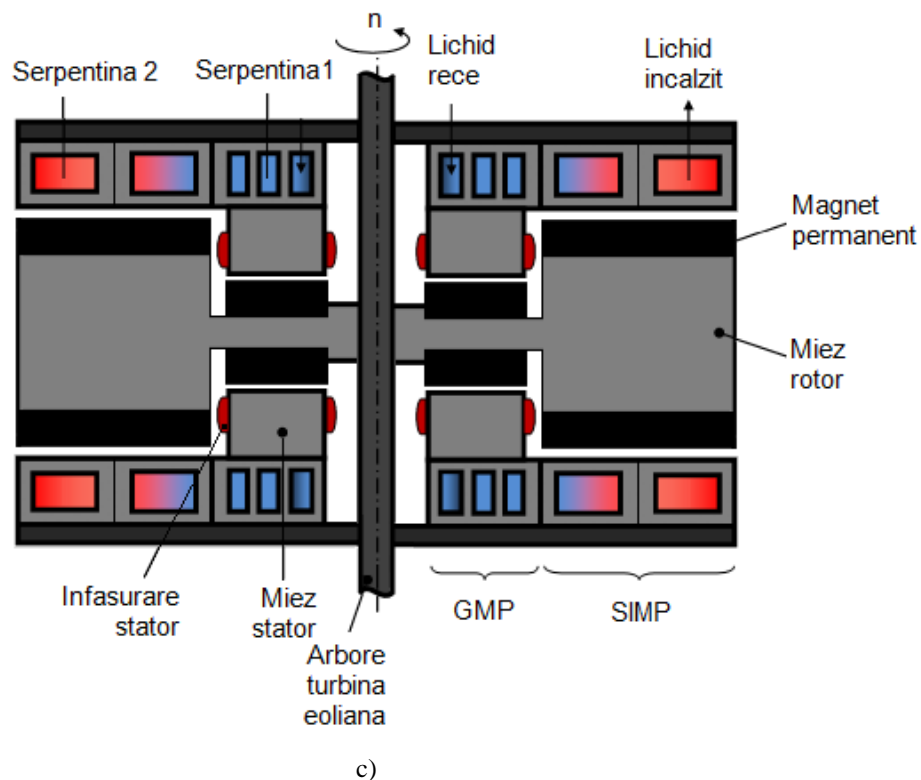


Fig. 12. Secțiuni axiale prin GEH în diferite variante constructive; a) GEH cu flux magnetic radial și rotor interior; b) GEH cu flux magnetic radial și rotor exterior; c) GEH cu flux magnetic axial.

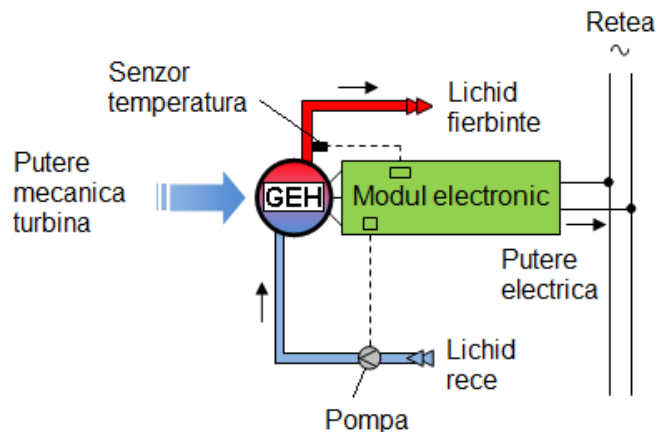


Fig. 13. Sistem de gestiune a energiei electrice și termice produse de GEH.

GEH prezintă mai multe avantaje în raport cu generatoarele eoliene clasice precum:

- permite conversia energiei eoliene simultan în energie electrică și termică cu un randament superior generatoarelor electrice clasice întrucât o mare parte a căldurii disipate în generator datorită pierderilor (pierderi în fier, pierderi Joule, pierderi prin curenți turbionari în magneți) este recuperată;

- dimensiuni de gabarit mai reduse decât în cazul generatoarelor electrice clasice (căldura datorată pierderilor este evacuată prin convecție forțată, prin urmare dimensionarea generatorului permite adoptarea unor densități mai mari de curent, cu o scădere a dimensiunilor de gabarit);

- GEH poate fi utilizat ca sursă de energie electrică cât și termică pentru diferite obiective rezidențiale sau industriale, fie în variantă independentă fie în combinație cu alte surse de energie (panouri fotovoltaice, panouri solare termice, pompe de căldură etc.);

- GEH prezintă o funcționare robustă la viteze mari ale vântului întrucât frânarea turbinei eoliene se efectuează în mod natural datorită curenților turbionari induși în serpentina generatorului;
- Gestionarea energiei termice este simplă (senzor de temperatură montat la ieșirea circuitului termic + controler + pompă); energia electrică produsă este livrată în rețea utilizând un convertor electronic clasic specific sistemelor eoliene clasice;
- GEH permite obținerea de energie electrică și termică ieftină.

Cele trei soluții de GEH prezentate anterior fac obiectul a trei cereri de brevet de invenție depuse la OSIM în luna Noiembrie 2014 [17]-[19]. Trebuie menționat faptul ca structurile din Fig. 12 sunt preliminare, prezentate în scopul descrierii principiului de funcționare, fără a oferi multe detalii constructive.

În urma analizelor efectuate, ținând cont de mai multe criterii precum fiabilitate, robustețe, costuri minime, simplitate constructivă, etc. s-a ales în vederea implementării în cadrul proiectului HYWINDT varianta constructivă de GEH cu flux magnetic radial și rotor interior. Această variantă constructivă permite o construcție simplă a miezului magnetic statoric al GMP ce poate fi realizat din tole din oțel electrotehnic, în mod similar cu miezurile statorice clasice ale mașinilor sincrone sau asincrone. Miezul rotoric este de asemenea simplu de realizat din oțel masiv pe acesta fiind dispuși magneții permanenți. Magneții pot fi montați pe suprafața rotorului, pot fi semiîngropați sau pot fi interiori (îngropați în miezul rotoric). Circuitul de răcire/încălzire alcătuit în principal din serpentinele 1 și 2, este de asemenea ușor de realizat, de exemplu din țevă din oțel izolată la exterior pentru a reduce pierderile termice.

Dimensionarea și proiectarea optimală a GEH cu toate elementele constructive aferente va fi abordată în etapa următoare a proiectului de cercetare, conform planului de realizare propus.

5. REZULTATE OBȚINUTE ÎN CADRUL ETAPEI CURENTE

Activitățile propuse în planul de realizare a proiectului pentru etapa curentă s-au efectuat integral. În urma cercetărilor întreprinse s-au obținut rezultatele prezentate de mai jos, care constau în 3 cereri de brevet de invenție depuse la OSIM, respectiv în elaborarea unei lucrări științifice în forma preliminară trimisă spre publicare la conferința internațională *The 17th IEEE European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2015)*:

Cereri de brevet de invenție depuse la OSIM:

[1] CBI A/00838/10.11.2014 depusă la OSIM: *Generator eolian hibrid cu flux magnetic radial și rotor exterior.*

[2] CBI A/00839/10.11.2014 depusă la OSIM: *Generator eolian hibrid cu flux magnetic radial și rotor interior.*

[3] CBI A/00840/10.11.2014 depusă la OSIM: *Generator eolian hibrid cu flux magnetic axial.*

Lucrări științifice trimise spre publicare la conferințe internaționale (ISI Proceedings):

[4] Floricău D., Tudorache T.: *A Novel Generalization of Boost-Type PFC Topologies with Multiple Switching Cells Connected in Series and Parallel*, propusă pentru *The 17th IEEE European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2015)*.

6. CONCLUZII

În cadrul *Etapei de execuție Nr. 1/2014* a proiectului HYWINDT (*Contract Nr. 41/2014*) au fost prevăzute trei activități cu caracter tehnic și științific, toate fiind realizate integral. Activitatea de cercetare efectuată în cadrul etapei curente a vizat analiza de soluții constructive fezabile de componente pentru TEH cu ax vertical, pregătirea documentației pentru brevetarea conceptelor inovative, respectiv analize privind alegerea variantei constructive a GEH.

Prima activitate a avut ca obiectiv analiza de soluții constructive de componente ce pot fi utilizate pentru TEH cu ax vertical. Cercetările efectuate au permis identificarea mai multor soluții constructive posibile de turbine cu ax vertical, de generatoare eoliene hibride (3 soluții constructive inovatoare protejate prin depunerea a 3 cereri de brevet de invenție la OSIM), de topologii de convertoare electronice pentru sisteme eoliene cu conectare la rețea sau folosite pentru stocarea energiei.

A doua activitate a urmărit elaborarea documentației tehnice necesare protecției proprietății intelectuale asupra conceptelor inovative, în urma activității de cercetare rezultând un număr de 3 cereri de brevet de invenție depuse la OSIM pe data de 10.11.2014. Cercetările efectuate s-au concretizat de asemenea prin elaborarea unei lucrări științifice trimisă în formă preliminară spre publicare, la conferința internațională *Conference on Power Electronics and Applications, EPE'15-ECCE Europe, Geneva, Switzerland*.

Ultima activitate inclusă în cadrul primei etape a proiectului HYWINDT conform planului de realizare a vizat efectuarea unor analize în vederea alegerii variantei constructive a GEH. Conform studiilor realizate asupra celor 3 soluții constructive de GEH propuse s-a indentificat soluția tehnică ce răspunde cel mai bine criteriilor impuse (fiabilitate, simplitate constructivă, costuri minime, robustețe).

7. BIBLIOGRAFIE

[1] <http://www.alibaba.com/>

[2] A. J. Pujante, E. Gómez, A. Molina, J. A. Fuentes and S. Martín: “State of the Art of Wind Turbines Modelling with Induction Generator (DFIG)”, European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC). Europe's premier wind energy event. 20-23 April 2010, Warsaw, Poland

[3] M. Liserre, R. Cardenas, M. Molinas, and J. Rodriguez, “Overview of multi-MW wind turbines and wind parks”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095, Apr. 2011.

[4] F. Blaabjerg, M. Liserre, and K. Ma, “Power electronics converters for wind turbine systems”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 48, no. 2, pp. 708–719, Mar./Apr. 2012.

[5] J. Dai, D. D. Xu, and B. Wu, “A novel control scheme for current-source converter-based PMSG wind energy conversion systems”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 4, pp. 963–972, Apr. 2009.

[6] K. Ma, F. Blaabjerg, and D. Xu, “Power devices loading in multilevel converters for 10 MW wind turbines”, in Proc. ISIE, Jun. 2011, pp. 340–346.

[7] J. Rodriguez, S. Bernet, P. K. Steimer, and I. E. Lizama, “A survey on neutral-point-clamped inverters”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 7, pp. 2219–2230, Jul. 2010.

[8] T. Bruckner, S. Bernet, and H. Guldner, “The active NPC converter and its loss-balancing control”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 3, pp. 855–868, Jun. 2005.

[9] D. Floricau, E. Floricau, M. Dumitrescu, “Natural Doubling of the Apparent Switching Frequency using Three-Level ANPC Converter”, International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation – ISNCC'08, Łagów, Poland, pp.1-6, 2008.

[10] D. Floricau and F. Richardeau, “New Multilevel Converters Based on Stacked Commutation Cells with Shared Power Devices”, IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol.58, No.10, pp.4675–4682, Oct.2011.

- [11] H. Chen, N. David, and D. C. Aliprantis, "Analysis of permanent-magnet synchronous generator with Vienna rectifier for wind energy conversion system", *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 154–161, Jan. 2013.
- [12] A. Rajaei, M. Mohamadian, and A.Y. Varjani, "Vienna-Rectifier-Based Direct Torque Control of PMSG for Wind Energy Application", *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, Vol.60, No.7, pp.2919–2929, Oct.2013.
- [13] J.W. Kolar and F.C. Zach, "A novel three-phase utility interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules", *Record of the 16th IEEE International Telecommunications Energy Conference*, Vancouver, Canada, Oct. 30 -NOV. 3, pp.367-374, 1994.
- [14] H. Midavaine, P.L. Moigne, and P. Bartholomeus, "Multilevel three phase rectifier with sinusoidal input currents", in *Proc. IEEE PESC'96*, pp.1595–1599, 1996.
- [15] M. S. Ortmann, S. A. Mussa, and M. L. Heldwein, "Three-Phase Multilevel PFC Rectifier Based on Multistate Switching Cells", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 4, pp. 1843-1854, Apr. 2015.
- [16] D. Floricau and T. Tudorache, "A Novel Generalization of Boost-type PFC Topologies with Multiple Switching Cells Connected in Series and Parallel", the 17th Conference on Power Electronics and Applications, EPE'15-ECCE Europe, Geneva, Switzerland, 8-10 Sept. 2015 (se află în procesul de recenzie).
- [17] CBI A/00838/10.11.2014 depusă la OSIM: "Generator eolian hibrid cu flux magnetic radial și rotor exterior".
- [18] CBI A/00839/10.11.2014 depusă la OSIM: "Generator eolian hibrid cu flux magnetic radial și rotor interior".
- [19] CBI A/00840/10.11.2014 depusă la OSIM: "Generator eolian hibrid cu flux magnetic axial".

Data: 01.12.2014