



RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC

LA PROIECTUL PCCA NR. 29 / 2012
‘Microsistem inovativ de conversie a energiei eoliene
pentru aplicații rezidențiale
utilizând generator electric cu acționare directă – INNOWECS’

(Coordonator : Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca (UTC-N))

- Iunie 2013 -

Analiza comparativă a topologiilor de microaerogeneratoare sincrone cu magneți permanenți și acționare directă

1. Introducere

Eforturile de cercetare depuse în ultimii ani de zile în domeniul centralelor eoliene de mici dimensiuni a dus la un progres tehnic al acestor sisteme. Generatorul destinat unei astfel de aplicație trebuie să fie compact, scăzut în greutate, să aibe o construcție mecanică robustă, cost redus de fabricație și ușor de integrat în sistemul microcentralei. De asemenea, pentru a evita problemele de pornire asociate diferitelor tipuri de turbine eoliene trebuie exclus cuplul parazită de dantură.

Comparat cu un sistem convențional cuplat la o cutie de viteze reies o serie de avantaje: dimensiuni reduse a întregului sistem, cost redus de instalare și mentenanță, control flexibil, răspuns rapid la fluctuații de viteză ale vântului.[1]

Proprietățile magneților permanenți au o influență ridicată asupra performanțelor mașinilor, oferind numeroase avantaje precum factor de putere și eficiență ridicate, valori mari ale cuplului în raport cu masa. Cerințele aplicației (cost, dimensiune și greutate) în care va urma a fi folosită mașina decid tipul de magnet permanent utilizat. În proiectarea inițială nu trebuie neglijată temperatura de funcționare, limita de greutate și spațiu.[1]

O comparație generală între generatoarele cu flux axial și cele cu flux radial nu este posibilă datorită numeroaselor variante tehnice, din această motiv comparația va fi concentrată pe două tipuri de generatoare sincrone cu magneți permanenți (cu flux radial și flux axial) alese în urma unei analize între:

- Generatorul sincron cu magneți permanenți și flux radial cu rotor exterior și o structura identică dar cu rotor interior;
- Generatorul sincorn cu magneți permanenți și flux axial cu două rotoare exterioare și un stator dublu;

2. Analiza aerogeneratoarelor sincrone cu magneți permanenți și flux radial

Mașinile cu diametrul interior al statorului d_{is} au o circumferință πd_{is} ; neglijând lungimea întrefierului, care este foarte mică, se poate considera diametrul exterior al rotorului, ca fiind egal cu diametrul interior al statorului d_{is} . Se poate calcula, astfel, pasul polar :

$$\tau_p = \frac{d_{is}\pi}{2p}. \quad (2.1)$$

Curentul din înfășurarea statorică se presupune a fi uniform distribuit pe întreaga circumferință a statorului, formând o pânză de curent:

$$A = \frac{\theta}{\tau_p} = \frac{2 \cdot m \cdot N_s \cdot I_s}{2p \cdot \tau_p}. \quad (2.2)$$

Cuplul electromagnetic dezvoltat se poate calcula prin relația :

$$M_e = F \cdot \frac{d_{is}}{2} = l \cdot (p\tau_p)^2 \hat{A} \cdot \hat{B}_\delta \cdot \cos \varphi_i / \pi \quad (2.3)$$

unde forța tangențială F este egală cu

$$F = l \cdot 2p\tau_p \cdot \hat{A} \cdot \hat{B}_\delta \cdot \alpha_e. \quad (2.4)$$

Cunoscând viteza de sincronism n_{syn} , se poate calcula puterea electromagnetică:

$$P_\delta = 2\pi \cdot n_{sync} \cdot M_e \quad (2.5)$$

Pentru valoarea $\cos \varphi_i = 1$, se obține valoarea maximă pentru puterea P_δ , în acest caz, fiind egală cu puterea aparentă S_δ . *Utilizarea electromagnetică* poate fi, astfel, calculată din S_δ și volumul alezajului statoric, care este exprimat prin *numărul lui Esson*:

$$C = \frac{S_\delta}{d^2 \cdot l \cdot n_{sync}} = \frac{\pi^2}{2} \cdot \hat{A} \cdot \hat{B}_\delta \quad (2.6)$$

$$\text{unde} \quad \hat{A} = \sqrt{2} \cdot k_w \cdot A \quad (2.7)$$

Utilizarea electromagnetică depinde de densitatea de curent, inducția magnetică din întrefier și factorul de înfășurare. Inducția magnetică din întrefier este limitată la 1 T, pentru a se evita saturarea oțelului dinților statorici, iar densitatea de curent este limitată de sistemul de răcire [2].

2.1. Generatorul sincron cu rotor interior, magneți permanenți și flux radial

Pentru proiectarea unui generator de 1,5 kW cu acționare directă și turația nominală de $n = 400$ rot/min, conform cu relația (2.8), un cuplu de $M=37,5$ Nm este necesar. Luând în considerare pierderile, valoarea cuplului pe întreg procesul de analiză și proiectare va fi de $M = 40$ Nm.

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} \quad (2.8)$$

Tabelul 2.1. Parametrii generatorului sincron cu rotor interior și magneți permanenți

Putere	1,5 kW
Număr de perechi de poli	5
Număr de creștături	48
Lungimea întrefierului	1 mm
Volumul de magneți permanenți	0,74 kg
Diametrul exterior al statorului	231 mm
Diametrul interior al statorului	169 mm
Lungimea axială a generatorului	45 mm
Grosimea magnetului	5 mm
Curentul pe fază	20 A
Numărul de spire în serie pe fază	480

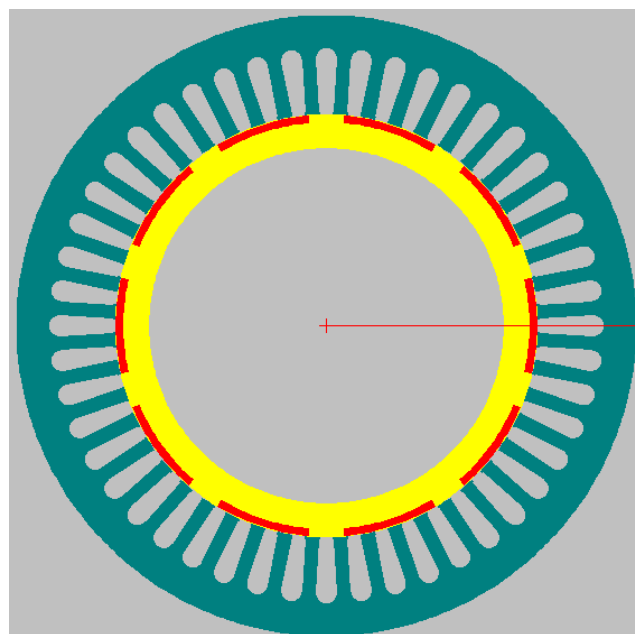


Fig.1. Modelul de analiză pentru generatorul cu rotor interior și magneți permanenți realizat în programul SPEED.

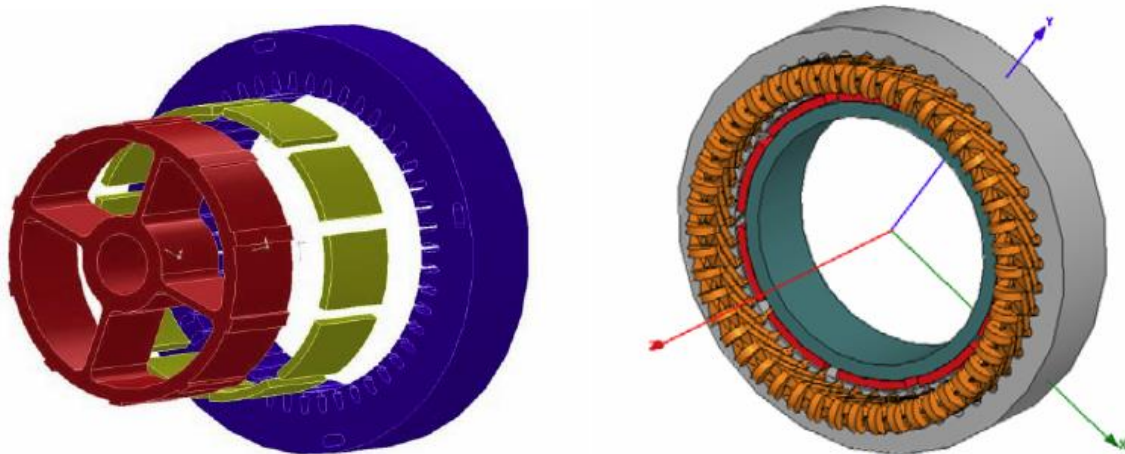


Fig. 2. Modelul 3 D al generatorului cu rotor interior și magneți permanenți [3].

Inducția magnetică din întrefier este în strânsă corelație cu magnetizația remanentă a magneților permanenți rotorici, fiind dificil de obținut o inducție ridicată utilizând în această topologie magneți cu remanență scăzută (ferite) [3].

2.2. Generatorul sincron cu rotor exterior, magneți permanenți și flux radial

Generatorul cu rotor exterior, magneți permanenți și flux radial prezintă avantajul de a permite montarea unui număr mai mare de perechi de poli, fără modificarea dimensiunilor mașinii. Magneții montați pe rotorul exterior beneficiază de o răcire îmbunătățită, iar asupra lor forța centrifugă acționează fără riscul de a-i desprinde.

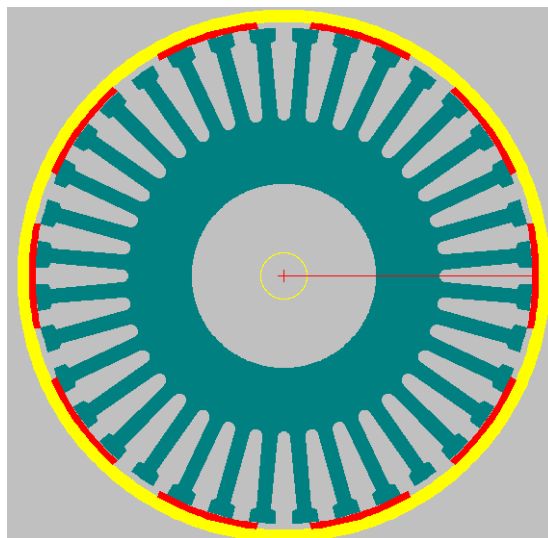


Fig.3. Modelul de analiză pentru generatorul cu rotor exterior și magneți permanenți realizat în programul SPEED.

Tabelul 2.2. Parametrii generatorului sincron cu rotor exterior și magneți permanenți

Putere	1 kW
Număr de perechi de poli	5
Număr de creștături	36
Lungimea întrefierului	1 mm
Volumul de magneți permanenți	0,74 kg
Diametrul exterior al statorului	155 mm
Diametrul interior al statorului	65 mm
Lungimea axială a generatorului	45 mm
Grosimea magnetului	5 mm
Curentul pe fază	15 A
Numărul de spire în serie pe fază	360

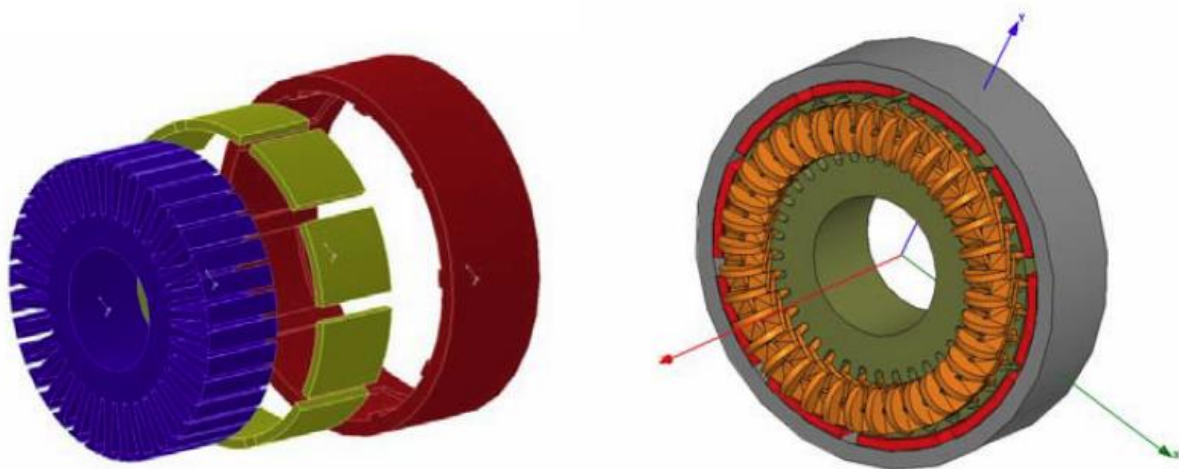


Fig. 4. Modelul 3 D al generatorului cu rotor interior și magneți permanenți [3].

2.3. Comparație între generatorul cu rotor interior și cel cu rotor exterior

Fig. 5 ilustrează puterea debitată în funcție de viteză, în cazul celor două generatoare, acestea având o topologie cu 5 perechi de poli, pentru funcționarea la o viteză de referință de

400 rot/min și o frecvență de 33.3 Hz. Se observă, că generatorul cu rotor interior este superior, valoarea puterii debitate fiind mai mare, dar pentru un volum și cost ridicat.

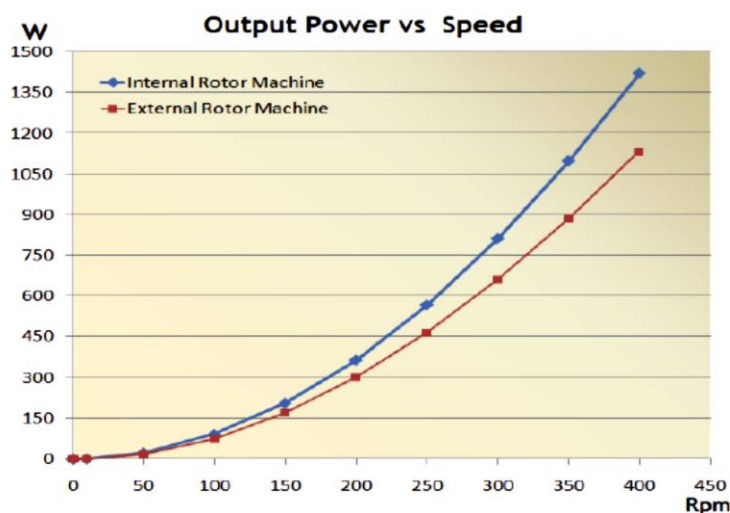


Fig. 5. Puterea electrică debitată în funcție de viteză pentru ambele generatoare.

O scurtă analiză a Tabelului 2.3 scoate în evidență diferențele dintre cele două generatoare: structura cu rotor exterior este mai ușoară, are un consum mai mic de cupru pentru înfășurări și, datorită structurii mai compacte, în procesul de fabricare a statorului este nevoie de o cantitate de material mai redusă.

În urma analizei de câmp, s-a obținut un cuplu electromagnetic de $M=36.2$ Nm pentru generatorul cu rotor interior, respectiv, de $M=32.4$ pentru generatorul cu rotor exterior. Configurația cu rotor exterior beneficiază de avantajul unei răcirii mai bune și posibilitatea unei instalări simple, fiind mai potrivită pentru aplicații în microcentrale eoliene. Costul unui astfel de generator scade datorită masei totale mai reduse de material activ, aceasta fiind un factor important în alegerea generatorului pentru o turbină eoliană cu montaj pe acoperișul clădirilor.

Tabelul 2.3. Consumul de material activ la construcția celor două generatoare

Consum de material activ	Generator cu rotor interior	Generator cu rotor exterior
Cupru înfășurări (kg)	3,98	2,36
Magnet (kg)	0,74	0,74
Stator (oțel kg)	5,69	3,43
Rotor (oțel kg)	1,4	1,55
Greutate totală (kg)	11,82	8,01

Pentru validarea rezultatelor obținute, simulările s-au efectuat și în programul de analiză numerică de câmp JMag Designer 12, obținându-se rezultate foarte apropiate (Tabelul 2.4).

Tabelul 2.4. Valorile cuplului electromagnetic magnetic obținute în urma analizei comparative de câmp în programele de simulare SPEED și Jmag, pentru cele două generatoare considerate

	SPEED	JMag Designer 12
Generator cu rotor interior	M=36,2 Nm	M=35,8 Nm
Generator cu rotor exterior	M=32,4 Nm	M=32,3 Nm

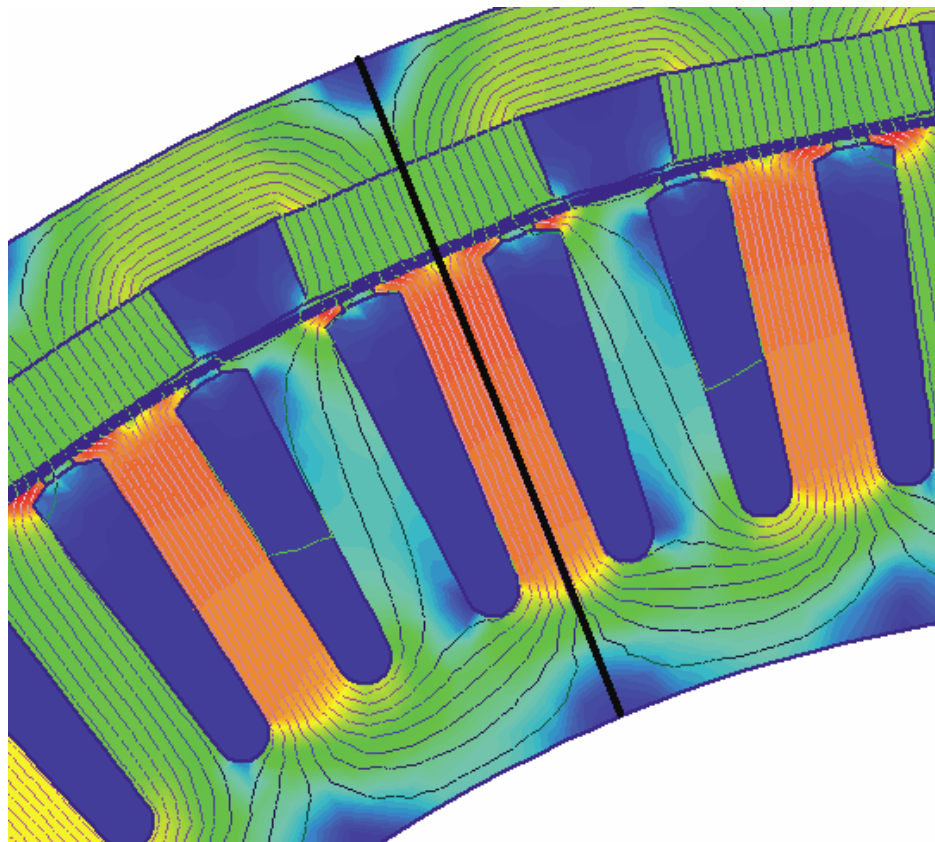


Fig.6. Rezultatul analizei de câmp a generatorului cu rotor exterior, magneți permanenți și flux radial, realizată în mediul de calcul JMag Designer 12.

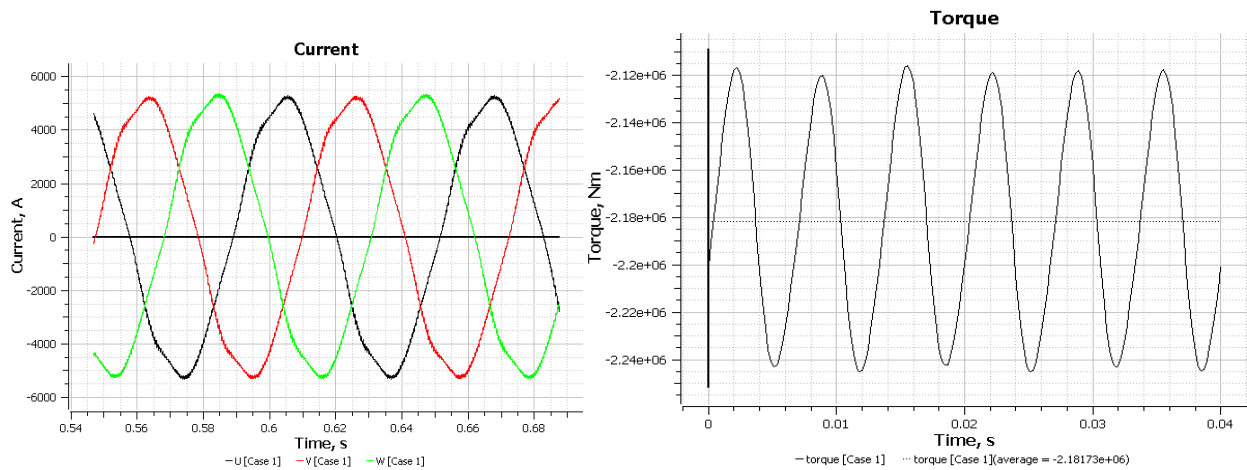


Fig.7. Formele de undă ale curentului din înfășurările de fază statorice și cuplului electromagnetic, ca rezultat al analizei de câmp în mediul de calcul Jmag Designer12

3. Analiza aerogeneratoarelor sincrone cu magneți permanenți și flux axial

În ultimii ani, generatoarele cu flux axial au fost obiectul unor numeroase studii, diferite structuri și geometrii au fost propuse pentru diferite aplicații ca și alternativă pentru convenționalele generatoare cu flux radial.

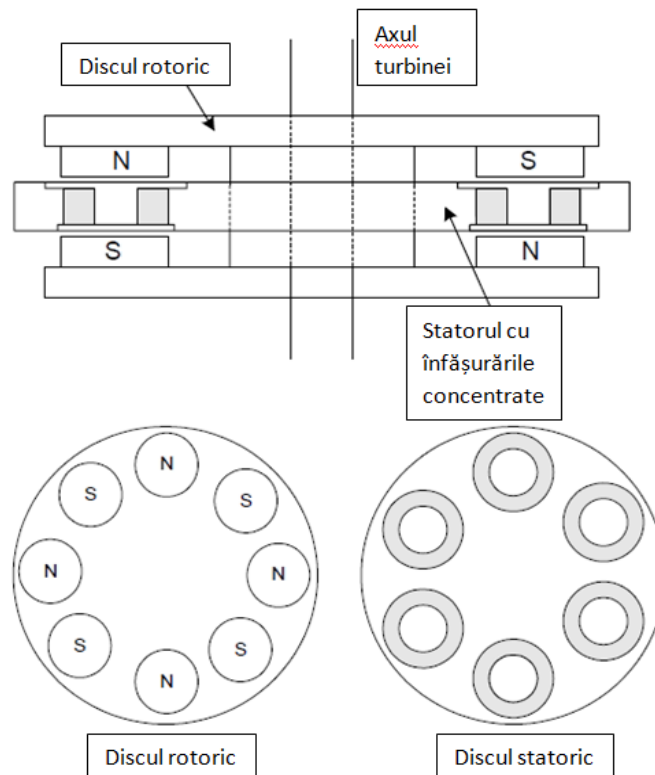


Fig. 8. Topologia generatorului sincron cu magneți permanenți și flux axial.

Un interes crescut a apărut recent pentru mașinile sincrone cu magneti permanenți și înfășurare concentrată, datorită avantajelor de fabricare, în special în cazul segmentării, dar și pentru rezultate superioare în producerea cuplului. Avantaje în utilizarea configurației cu înfășurare concentrată:

- Procesul de fabricare și asamblare este mai simplu;
- Se poate acomoda un număr crescut de poli, obținându-se o densitate mai mare a cuplului;
- Reducerea pierderilor în cupru și a cuplului parazit de dantură.

Prin utilizarea înfășurării concentrate, în două straturi, două bobine a două faze diferite se învecinează în aceeași crestătură, iar numărul bobinelor statorice este egal cu numărul crestăturilor statorice.

Numărul bobinelor dintr-un grup de bobine (z) se determină prin

$$z = \frac{Q_s}{m \times F} \cdot \quad (3.1)$$

unde F reprezintă cel mai mare divizor comun al numărului de poli rotorici și de bobine (sau crestături) statorice:

$$F = \text{CMMDC}(2p, Q_s). \quad (3.2)$$

Cel mai mic multiplu comun al numărului de poli din rotor și al crestăturilor statorice $\text{CMMMC}(2p, Q_s)$ este recomandat să fie cât mai mare posibil. Frecvența armonicilor corespunzătoare CMMMC reprezintă frecvența cuplului parazit de dantură [4].

Există un set de reguli pentru alegerea combinației numărului de poli rotorici și crestături statorice, care favorizează utilizarea înfășurărilor concentrate:

- Numărul de poli trebuie să fie par;
- Numărul de crestături trebuie să fie multiplu al numărului de faze;
- Numărul bobinelor și al crestăturilor este egal în cazul înfășurării în două straturi;
- Numărul bobinelor într-un grup de bobine trebuie să fie număr întreg;
- Numărul de crestături nu poate fi egal cu cel al numărului de poli.

Rezultă următoarea condiție:

$$\frac{Q_s}{[\text{CMMDC}(S, 2p)]} = mC, \quad (3.3)$$

unde C este un număr întreg pozitiv, m este numărul de faze [4].

O secvență cu repetabilitate de "0" și "1" specifică înfășurării poate fi derivată din această condiție (Fig.9).



Fig. 9. Ordinea de succesiune a fazelor pentru înfășurarea trifazată concentrată.

Numărul "1" din secvență este egal cu b, iar "0" este egal cu (c-b). Fig. 9 arată că secvența optimă de repetabilitate este 10010. Bobinele asociate numărului "1" sunt alese să formeze primul strat al înfășurării. Al doilea strat este obținut defazând primul strat cu o creștătură sau un dinte și inversând polaritatea.

$$AA'B'BCC' \quad (\text{primul strat})$$

$$A'ABB'C'C \quad (\text{stratul al 2- lea})$$

Se poate calcula factorul de înfășurare astfel [1]:

$$k_w = k_d \times k_p = \frac{\sin\left(\frac{0.5v\pi}{3}\right)}{z\sin\left(\frac{0.5v\pi}{3z}\right)} \times \sin\left(\frac{0.5v\pi W}{\tau}\right) \quad (3.5)$$

$$q = \frac{Q_s}{2p \times m} = \frac{q_s}{2p_s \times m} = \frac{z}{b} \quad (z \text{ și } b \text{ sunt întregi}) \quad (3.6)$$

$$k_{dv} = \frac{\sin\left(\frac{0.5v\pi}{m}\right)}{z\sin\left(\frac{0.5v\pi}{mz}\right)} \quad (\text{factor de repartizare a bobinelor}) \quad (3.7)$$

$$k_{pv} = \sin\left(\frac{0.5v\pi}{\tau_p}\right) = \sin\left(\frac{0.5v\pi}{mq}\right) \quad (\text{factor de scurtare a pasului bobinei față de pasul diametral}) \quad (3.8)$$

Tabelul 3.1. Parametrii generatorului sincron cu magneți permanenți și flux axial

Putere	1 kW
Turație	300 rot/min
Frecvență	40 Hz
Număr faze	3
Diametrul exterior al generatorului	462 mm
Diametrul interior al generatorului	180 mm
Lungimea axială a generatorului	55 mm
Număr de bobine	12
Lungime întrefier	1 mm
Număr poli rotorici	16

Discul statoric poate fi construit din material nemagnetic, neconductor (PVC), având excavații în suprafața acestuia, pentru dispunerea înfășurărilor concentrate, care vor fi impregnate în rășină (Fig.10). Un design segmentat se va alege în scopul facilitării montării și demontării generatorului.

Discul rotoric este construit dintr-un oțel moale, de care sunt lipiți magneții de formă cilindrică (Fig.11), prinderea acestora realizându-se nu numai magnetic, ci și mecanic printr-un manșon cu orificii, fixat prin șuruburi de discul rotoric [5].

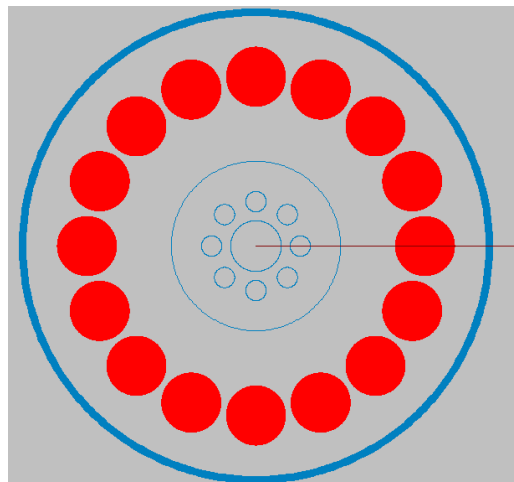


Fig.10. Modelul discului rotoric realizat în programul SPEED.

În urma analizei de câmp, s-a obținut o valoare a cuplului electromagnetic destul de apropiată de cea a generatoarelor cu flux radial, $M=34,6$ Nm. O analiză mai complexă este posibilă utilizând mediul de calcul Jmag Designer 12 și modulul 3D, obiectiv avut în vedere pentru etapa următoare a cercetării doctorale.

4. Concluzii

Analiza efectuată pentru cele două tipologii de generatoare sincrone cu magneți permanenți a scos în evidență avantajele și dezavantajele lor relative, pentru alegerea celei mai potrivite variante pentru o microcentrală eoliană de acoperiș, este necesară o analiză mai cuprinzătoare, integrând calculul termic și calculul pierderilor de energie, dar și o estimare a costurilor efective de construcție.

Tabelul 4.1. Date comparative pentru cele două tipologii de aerogeneratoare sincrone cu magneți permanenți

	Flux radial și rotor interior	Flux radial și rotor exterior	Flux axial
Cuplu electromagnetic M (Nm)	36,2	32,4231	34,6
Diametru exterior (mm)	231	231	462
Lungime axială generator(mm)	45	45	55
Număr poli rotorici	10	10	16
Turație (rot/min)	400	400	300
Putere (kW)	1,5	1	1
Număr bobine	48	36	12
Tip înfășurare trifazată	Distribuită	Distribuită	Concentrată

Bibliografie selectivă

- [1] J. F. Gieras, R.-J. Wang, M. J. Kamper, *Axial-Flux Permanent-Magnet Brushless Machines*, 2nd Edition, Springer, 2008
- [2] A. Binder, *Motor Development for Electrical Drive Systems*, Text book, TUD, 2006/07
- [3] Ī. Tarimer, C. Ocak, Performance Comparision of Internal and External Rotor Structured Wind Generators Mounted from Same Permanent Magnets on Same Geometry, *Electronics and Electrical Engineering (Lithuania)*, No.4, 2009, pp. 65-70.
- [4] A.M. El-Refaie, M.R. Shan, R. Qu and J.M. Kern, Effect of Number of Phases on Losses in Conducting Sleeves of Surface PM Machine Rotors Equipped with Fractional-Slot Concentrated Windings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no.5, 2008.
- [5] J.R. Bumby and R. Martin, Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines, *Proc. IEE – Electrical Power Applications*, Vol. 152, No. 5, 2005, pp 1065-1075.