

TITLUL TEZEI

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie electrică

autor ing. Constantin-Gabriel Dobrea

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Marius Biriescu

luna 05 anul 2022

Introducere

În ultimii ani, în pas cu progresul ingineriei și în conformitate cu Directivele Naționale și Internaționale de producere a energiei din surse regenerabile, tehnologia turbinelor eoliene a evoluat rapid, energia eoliană devenind una dintre cele mai competitive forme de energie dintre resursele de acest tip. În plus, au fost dezvoltate sistemele de conversie a energiei eoliene cu viteză variabilă și cu control activ asupra puterii și vitezei vântului care oferă o serie de avantaje și pot reduce solicitările în diferite părți ale structurii turbinelor, incluzând aici palele și turnul. Astfel durata lor de funcționare este mai lungă, eficiența totală mai mare și calitatea energiei îmbunătățită, motive care fac ca acest tip de turbine eoliene să fie competitive din punct de vedere economic, în ciuda costurilor inițiale mai mari [1].

Pe de altă parte, odată cu pătrunderea ascendentă a sistemelor de conversie a energiei eoliene cu viteză variabilă în sistemele energetice din întreaga lume, generatoarele sincrone cu magneți permanenți devin mai răspândite pentru utilizarea în aplicații cu viteză variabilă. Acestea oferă mai multe avantaje precum eliminarea sistemului de excitație, posibilitatea de funcționare în lipsa cutiei de viteze, controlul complet al sistemului și conversia puterii maxime obținută la variații ale vântului prin metoda de urmărire a punctului maxim al puterii, densitate mare de putere și precizie ridicată. În plus, dezvoltarea dispozitivelor cu electronică de putere a jucat un rol important în perfecționarea controlului și fiabilității acestora [1].

Scopul și obiectivele tezei

Necesitățile energetice în creștere continuă au condus la dezvoltarea a numeroase studii privind atât proiectarea optimală a mașinilor electrice cât și dezvoltarea acționărilor asistate de către electronica de putere. În această tendință de dezvoltare intră și mașinile sincrone, utilizate pentru aplicații cu acționare directă (ca motoare pentru propulsia vapoarelor, tracțiunea autovehiculelor, a lifturilor și ca generatoare pentru turbine eoliene, microhidrocentrale) care oferă cuplu mare și turație scăzută, spre exemplu în aplicațiile pentru turbinele eoliene din ansamblul cărora a fost eliminat multiplicatorul de viteză. Ca urmare a dezvoltării tehnologice rapide și a performanțelor oferite, magneții permanenți au ajuns să fie utilizați pe scară largă de la echipamente de uz casnic până la echipamente de uz industrial (ex.: sisteme de automatizare, mecatronică), fie ca motoare electrice în aplicații de tracțiune (ex.: autovehicule, lifturi, pompe, compresoare) și propulsie (ex.: vapoare) fie ca generatoare electrice. Se pretează foarte bine mai ales la mașinile sincrone cu viteză variabilă, încadrând astfel aici, printre altele, generatoarele turbinelor eoliene cu o plajă de funcționare kW-MW, generatoarele turbinelor cu funcționare pe bază de gaz, precum și utilizarea lor în sectorul vehiculelor electrice [2][3].

Mașinile electrice care folosesc drept sursă de excitație magneții permanenți atrag din ce în ce mai multă atenție atât din partea comunității de cercetare cât și din partea industriei energetice, iar dezvoltarea în domeniul materialelor cu pământuri rare le-a facilitat accesibilitatea. Avantajele oferite de către generatoarele sincrone cu magneți permanenți au condus la considerentul că acestea sunt printre cele mai eficiente mașini electrice utilizate în prezent. Astfel acestea reprezintă un subiect abordat în numeroase studii de cercetare, fiind experimentate diferite structuri și topologii pentru diverse aplicații. Utilizarea lor pe scară largă în aplicațiile eoliene cu puteri mici s-a dovedit a fi avantajoasă deoarece oferă eficiență ridicată, factor de putere ridicat și densitate de putere sporită [3][4][5].

În prezent există un interes ridicat în ceea ce privește utilizarea și dezvoltarea sistemelor de conversie a energiei eoliene pentru a genera energie electrică în zone urbane și rurale, în special unde conectarea la rețeaua de distribuție nu este posibilă sau nu este rezonabilă din punct de vedere economic. Astfel aceste generatoare se pretează foarte bine pentru utilizarea în aplicații precum iluminat stradal, pomparea apei, locuințe rezidențiale. Avantajele precum viteza mică a vântului la pornire și funcționarea la viteze moderate ale vântului facilitează instalarea pe scară largă a micro turbinelor eoliene în majoritatea zonelor din întreaga lume pentru exploatarea pe deplin a resurselor eoliene și sporirea semnificativă a disponibilității energiei eoliene [4][6].

Având în vedere actualitatea conversiei energiei eoliene și avantajele generatoarelor cu magneți permanenți, în această lucrare este prezentat și studiat un prototip de generator sincron cu magneți permanenți cu flux radial și cuplaj direct de putere 5kW în două variante constructive. Studiul se face plecând de la ideea că acest prototip este destinat utilizării în aplicații pentru turbine eoliene și micro hidrocentrale instalate în zone urbane sau rurale cu posibilitate de interconectare la rețea sau în regim autonom, fiind eficient pentru conversia energiei la turații scăzute. Cuplajul direct constituie un avantaj important în ceea ce privește costurile de fabricație și mentenanță, deoarece lipsa cutiei de viteze simplifică partea mecanică, crește fiabilitatea și în același timp reduce zgomotul, vibrațiile, greutatea și gabaritul generatorului. Lipsa multiplicatorului de viteză și funcționarea la turații joase necesită utilizarea unui număr mare de poli necesar pentru obținerea unei frecvențe de funcționare în plaja admisă pentru a nu fi afectată calitatea energiei electrice. Evaluarea performanțelor și procesul de analiză a unor aspecte precum proiectarea, topologia, structura și optimizarea generatorului sunt realizate cu ajutorul pachetului software OPERA 2D Vector Fields bazat pe metoda elementului finit. Ulterior rezultatele experimentale obținute pe baza simulărilor sunt comparate cu rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate pe standul existent în laborator.

Privind mențiunile anterioare, au fost stabilite pentru această teză următoarele obiective:

- trasarea modelului geometric al prototipului generatorului sincron cu magneți permanenți montați pe suprafața rotorului și un număr foarte mic de creștături pe pol și fază în stator ($q=0.34$) – Prototip 1, cu ajutorul interfeței CAD în mediul software OPERA, varianta 2D;
- obținerea și interpretarea spectrului câmpului electromagnetic calculat cu ajutorul metodei elementului finit;
- prezentarea formelor de undă ale tensiunii electromotoare indusă pentru diferite turații;
- determinarea cuplului parazit al prototipului;
- obținerea caracteristicii externe și prezentarea unor metode de îmbunătățire ale acesteia;
- efectuarea măsurărilor pe standul de probă și compararea acestora cu rezultatele obținute în urma simulărilor în mediul OPERA;

- analiza cu metoda elementului finit a unui generator sincron cu magneți permanenți inserați în rotor pentru a demonstra efectul de saliență inversă care se va observa că este semnificativ doar în cazul generatoarelor cu un număr mic de poli;
- studiul unui prototip de generator sincron cu magneți permanenți montați pe suprafața rotorului și un număr mic de creștături pe pol și fază în stator ($q=0.65$) – Prototip 2, și compararea acestuia cu Prototipul 1.

Pentru îndeplinirea acestor obiective și implementarea programului de cercetare au fost utilizate două resurse fizice principale disponibile în cadrul UPT, și anume:

- standul experimental care este alcătuit din prototipul unui generator sincron cu magneți permanenți de putere nominală 5 kW și turație nominală 120 rot/min care este pus în mișcare de către o mașină de antrenare la turație variabilă;
- programul software OPERA Vector Fields cu licență și dongle cu număr nelimitat de noduri pentru calculul numeric.

Structura tezei

Din punct de vedere structural teza prezentată este organizată pe un număr de opt capitole.

Capitolul 1. Conversia energiei eoliene în energie electrică

În acest capitol este prezentată importanța energiei eoliene pentru omenire încă din cele mai vechi timpuri și până în prezent, precum și modul în care oamenii au știut să îi acorde întrebuințarea potrivită. În zilele noastre, principala întrebuințare a energiei eoliene este în sectorul energetic și pe piața de energie electrică. A fost considerată necesară abordarea acestui capitol în cadrul tezei deoarece generatorul analizat este destinat în special aplicațiilor de conversie a energiei eoliene în energie electrică.

Sintetizând ideile din acest capitol se poate afirma că energia eoliană a reprezentat mereu un interes, în special în sectorul de conversie a sa în energie electrică, fiind construite și dezvoltate de-a lungul timpului diferite concepte de turbine eoliene pentru maximizarea producției de energie electrică, minimizarea costurilor de producție și de întreținere, creșterea eficienței și a fiabilității. Astfel s-a ajuns la conceperea unor turbine eoliene cu putere nominală de 9,5 MW.

Un rol important în acest proces de dezvoltare l-au avut și îl au în continuare generatoarele sincrone, acest trend ducând implicit și la studierea și analizarea foarte detaliată a acestora pentru îmbunătățirea performanțelor, oferirea unui randament cât mai ridicat în procesul de conversie a energiei și furnizarea de energie electrică de cea mai bună calitate și la cele mai înalte standarde.

S-a constatat că de-a lungul timpului au fost construite și dezvoltate diferite tipuri și concepte de turbine eoliene în funcție de generatorul electric utilizat. De exemplu primele prototipuri de turbine eoliene conectate la rețea funcționau la viteză fixă și au fost echipate cu generatoare sincrone, însă la scurt timp a fost adoptat ca și soluție mai puțin costisitoare și mai simplă din punct de vedere tehnologic generatorul de inducție cu rotor în colivie. În jurul anilor 1990 a fost introdus la sistemele eoliene generatorul de inducție cu alimentare dublă care a permis un control mult mai bun al transferului de putere electrică înspre consumatori. Un rol important în acest proces l-a avut și îl are în continuare electronica de putere prin intermediul căreia sunt facilitate controlul și optimizarea conversiei energiei eoliene.

S-a observat că în zilele noastre mulți producători de turbine eoliene se axează pe turbine eoliene cu viteză variabilă, deși sistemul electric pentru funcționarea în această configurație este mult mai complicat în comparație cu sistemul turbinelor eoliene cu viteză fixă. Unul dintre avantajele turbinelor eoliene cu viteză variabilă îl reprezintă faptul că acestea

pot fi folosite pentru o gamă largă de viteze ale vântului, astfel viteza vântului poate fi controlată și randamentul turbinei eoliene poate fi maximizat.

Conform rapoartelor anuale producția de energie electrică arată că aceasta se află pe un trend ascendent de la an la an. Conform BP Statistical Review of World Energy June 2018, în anul 2017 producția de energie electrică la nivel mondial se situează la valoarea de 25551,3 TWh, înregistrând un procent de creștere anual de 2,8% calculat în intervalul anilor 1985 – 2017.

În ceea ce privește conversia energiei eoliene în energie electrică, rata de creștere anuală în acest sector a fost una ridicată, mai ales pentru perioada 2006 – 2016, în care s-a înregistrat o valoare de 21,9%.

Capacitatea instalată cumulată de energie eoliană la nivel global în anul 2017 se regăsește la valoarea de 514,7 GW, conform surselor IRENA, Global Wind Energy Council și Navigant Consulting, liderul mondial fiind China cu o putere instalată de 164,1 GW.

Conform BP Statistical Review of World Energy June 2018 România se afla la sfârșitul anului 2017 pe locul 12 în Europa într-un clasament în ceea ce privește puterea instalată cumulată în turbinele eoliene, cu o valoare de 3038 MW.

Datorită progresului semnificativ în ceea ce privește creșterea ponderii de energie eoliană în sectorul energiei electrice la nivel mondial rezultă o altă provocare, și anume integrarea turbinelor eoliene în sistemul electroenergetic și impactul lor asupra acestuia.

Capitolul 2. Generatoare sincrone cu magneți permanenți și turație scăzută

Al doilea capitol al tezei este dedicat pentru descrierea pe scurt a mașinilor electrice rotative din punct de vedere constructiv, funcțional și fenomenologic, în special a mașinii sincrone. Sunt prezentate caracteristicile generatoarelor cu magneți permanenți, modurile de utilizare și consecințele asupra soluțiilor constructive, precum și avantajele și dezavantajele dintre diferite tipuri de generatoare sincrone care utilizează magneți permanenți, dar și comparația acestora cu generatoarele uzuale. Este prezentată o scurtă istorie a evoluției magneților permanenți, a tipurilor acestora și a avantajelor care îi propun pentru utilizarea în domeniul mașinilor electrice.

În ceea ce privește utilizarea generatoarelor sincrone de puteri mici la sistemele eoliene, evident acestea sunt mai puțin semnificative din punct de vedere energetic decât generatoarele de puteri mari din cadrul sistemelor eoliene, însă avantajul generatoarelor de puteri mici îl reprezintă faptul că odată cu creșterea cererii va crește și interesul în ceea ce privește cercetarea și dezvoltarea lor, fapt care va conduce la îmbunătățirea fiabilității, în timp ce costurile vor scădea. Un alt avantaj al sistemelor eoliene de puteri mici este utilizarea lor în regim autonom, în zonele izolate unde nu este posibilă sau nu este fiabilă din punct de vedere economic conectarea consumatorului la rețea.

S-a observat că din punct de vedere tehnic prezența electronicii de putere a produs un imbold care a dus la creșterea interesului pentru concepte care funcționează la viteză variabilă. Aceste inovații s-au dovedit a fi utile pentru turbinele eoliene din mai multe motive printre care reducerea stresului mecanic, creșterea capacității de captare a energiei vântului, reducerea zgomotului și un control sporit.

Capitolul 3. Metoda elementului finit utilizată la studiul câmpului electromagnetic – mediul “OPERA”

Acest capitol oferă noțiuni generale referitoare la influența calculului ingineresc și a metodelor numerice ca și componente esențiale ale procesului de proiectare în evoluția tehnologiei și a progresului omenirii. De asemenea, este realizată o prezentare de ansamblu asupra metodei elementelor finite și a programului software OPERA.

Odată cu creșterea rapidă a cererii de mașini electrice de înaltă performanță, inginerii

sunt la ora actuală însărcinați cu multe cerințe și specificații concurente în ceea ce privește proiectarea sau îmbunătățirea performanțelor unui astfel de produs. Indiferent că este vorba despre aplicații ale motoarelor pentru acționări electrice sau procese industriale, fie despre aplicații ale generatoarelor pentru surse de energie regenerabilă, inginerii se confruntă cu provocarea de a realiza modele ale acestora care să reprezinte în practică soluții convenabile prin eficiență sporită, randament crescut, să fie fiabile, să ocupe un volum redus, să fie mai ușoare și să aibă un impact redus asupra mediului înconjurător. Multe companii utilizează în acest sens simularea cu ajutorul pachetelor software dedicate, unul dintre acestea fiind OPERA, un mediu software bazat pe metoda elementului finit (MEF), reprezentând o parte de rutină a procesului de dezvoltare, recunoscând beneficiile utilizării sale pentru a răspunde provocărilor ingineresti [7].

Se constată că în zilele noastre metodele numerice de calcul implementate pe computere a căror putere de calcul a fost îmbunătățită vertiginos au condus la apariția pachetelor software dedicate, care la ora actuală reprezintă instrumente puternice utilizate pe scară largă în aplicații industriale și științifice datorită avantajelor pe care le prezintă. Printre cele mai importante avantaje pe care le facilitează acestea sunt scăderea timpului de calcul, mărirea preciziei precum și diversificarea semnificativă a mărimilor și a caracteristicilor care se pot determina.

Majoritatea acestor medii software au la bază principiul metodei elementului finit, metodă extrem de utilă și eficientă pentru rezolvarea problemelor de la cele mai simple până la cele mai complexe, indiferent de tipul constructiv al structurii analizate, materialul utilizat, tipul de analiză, etc. Filozofia de calcul abordată de către aceasta, principalele legi și teoreme, etapele care sunt parcurse la construirea și rezolvarea unui model, precum și principalele domenii de aplicabilitate ale metodei au fost prezentate în acest capitol. Au fost prezentate de asemenea cele mai importante teorii ale electromagnetismului pe baza cărora se pot determina soluțiile ecuațiilor care descriu câmpul electromagnetic al mașinilor electrice.

Capitolul 4. Analiza numerică a unui generator sincron cu magneți permanenți 5 kVA cu turație scăzută – Prototip 1

Capitolul acesta este dedicat prezentării și analizei prototipului generatorului sincron cu magneți permanenți studiat. Sunt prezentate datele constructive ale generatorului și este trasată geometria de tip 2D a generatorului cu ajutorul librăriei CAD oferită de către mediul OPERA, iar apoi este realizată analiza numerică în acest program software bazat pe metoda elementului finit pentru evaluarea și îmbunătățirea performanțelor generatorului.

După construirea modelului a fost realizată atât analiza în regim static a generatorului, cât și analiza în mișcare de rotație. La analiza în regim static a fost îndeplinit unul dintre principalele obiective propuse pentru analiza performanțelor generatorului sincron cu magneți permanenți studiat și anume obținerea spectrului câmpului magnetic. Determinarea acestuia reprezintă punctul de plecare pentru analiza performanțelor generatorului, rezultând mai departe diferite caracteristici și diferiți parametri precum formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse, caracteristica externă a generatorului, curenți, randament, cuplul parazit, etc. De asemenea, soluția câmpului magnetic oferită de către mediul OPERA permite analizarea unor aspecte legate de procesul de proiectare, respectiv de funcționare a mașinii electrice, precum identificarea eventualelor zone feromagnetice saturate pentru care este necesară revenirea asupra procesului de proiectare și calculul pierderilor în fier din circuitul magnetic principal sau din diferite regiuni adiacente. Tot referitor la distribuția câmpului magnetic a fost evidențiată cu ajutorul simulărilor în OPERA variația fluxului magnetic util și al fluxului de dispersie în funcție de poziția magnetului în raport cu dinții statorului și de asemenea variația componentei normale a inducției B_n în întrefier pe întreaga mașină pentru o poziție oarecare a rotorului.

Un alt aspect important evidențiat în acest capitol a fost influența numărului de noduri impus de către utilizator asupra preciziei rezultatelor obținute în OPERA, impactul acestora fiind oglindit asupra liniilor câmpului magnetic. Acest lucru a fost exemplificat prin afișarea spectrului câmpului magnetic calculat în OPERA pe baza a trei rețele de discretizare distincte din punct de vedere al numărului de noduri. Din acest exemplu s-a constatat faptul că numărul de elemente finite impuse de către utilizator influențează în mod direct calculele și automat și rezultatele obținute, astfel că numărul de noduri trebuie ales optim astfel încât să influențeze cât mai puțin eroarea de calcul.

În cadrul analizei în mișcare de rotație a generatorului sincron cu magneți permanenți studiat au fost obținute în primă fază formele de undă ale tensiunii electromotoare induse pentru funcționarea în gol la turația nominală. De asemenea, a fost determinat grafic unul dintre parametrii importanți de proiectare la generatoarele sincrone cu magneți permanenți și anume cuplul parazit. Deoarece acesta nu contribuie la valoarea cuplului util și mai mult decât atât poate avea efecte negative asupra funcționării mașinii, manifestate prin fenomene tranzitorii și inducerea vibrațiilor, este importantă cunoașterea valorii acestuia. Pe baza calculelor cu metoda elementului finit în OPERA s-a constatat că pentru generatorul sincron studiat cuplul parazit determinat grafic reprezintă valori relativ scăzute, încadrându-se undeva la aproximativ 0.17% din cuplul nominal. Este cunoscut faptul că pentru valori ridicate ale cuplului parazit poate fi afectată funcționarea normală și pornirea ansamblului eolian la viteze mici ale vântului, fiind afectat astfel și randamentul generatorului. În acest caz, cunoașterea acestui parametru este deosebit de utilă pentru generatorul sincron cu magneți permanenți studiat, valoarea sa scăzută garantând în primul rând faptul că acesta poate să fie eficient și în zonele cu potențial eolian mai redus.

Analiza generatorului sincron cu magneți permanenți pe baza modelului de câmp magnetic reprezentat 2D cu ajutorul OPERA bazat pe calculul cu metoda elementului finit se dovedește a fi deosebit de utilă, mai ales în procesul de proiectare, deoarece permite atât modelarea regimului de funcționare în gol, cât și optimizarea constructiv-funcțională a generatorului.

Tot în cadrul acestui capitol au fost amintite pe scurt caracteristicile de funcționare ale generatoarelor sincrone. Deoarece generatorul sincron cu magneți permanenți studiat este dedicat în special aplicațiilor eoliene și funcționării în regim autonom, este foarte important a se cunoaște caracteristica sa externă, aceasta fiind un parametru care oferă informații cu privire la calitatea energiei electrice. În acest sens au fost efectuate o serie de simulări în OPERA pentru diferite sarcini de încărcare rezistivă, fiind obținute rezultate calculate pe baza metodei elementului finit cu ajutorul cărora a fost construită caracteristica externă.

Pornind de la ipoteze abordate în articole din literatura de specialitate a fost efectuată o cercetare experimentală referitoare la influența lățimii magneților permanenți asupra caracteristicii externe pentru prototipul generatorului sincron studiat. Cu ajutorul mediului OPERA a fost redefinită geometria inițială a magneților permanenți și au fost efectuate mai multe simulări pentru diferite lățimi ale acestora. Pe baza rezultatelor obținute au fost trasate caracteristicile externe pentru fiecare caz și comparate între ele, fiind concluzionat faptul că valoarea efectivă a tensiunii induse este dependentă direct proporțional cu valoarea lungimii acestora.

De asemenea au fost realizate o serie de simulări în OPERA pentru determinarea influenței lățimii magneților permanenți asupra cuplului parazit. S-a constatat faptul că valoarea cea mai mare a cuplului parazit corespunde pentru magneți cu lățimea $l_m = 32 \text{ mm}$. S-a observat că odată cu reducerea lățimii magneților permanenți la valori cuprinse între 28-32 mm amplitudinea cuplului parazit a scăzut semnificativ. Scăzând în continuare lățimea magneților la valoarea $l_m = 24 \text{ mm}$ se observă o creștere a valorii cuplului.

Ținând cont de rezultatele obținute în urma simulărilor în OPERA s-a demonstrat

faptul că în ceea ce privește caracteristica externă și cuplul parazit lățimea optimă pentru magneții permanenți este cea aleasă și în datele de proiectare, $l_m = 32 \text{ mm}$. Deși din punct de vedere al cuplului parazit acesta are valoarea cea mai mică pentru $l_m = 28 \text{ mm}$, magneții permanenți cu lățimea $l_m = 32 \text{ mm}$ sunt superiori celor de $l_m = 28 \text{ mm}$ din punct de vedere al comparației caracteristicilor externe obținute în cele două cazuri la sarcini de încărcare identice. Spre exemplu valoarea tensiunii electromotoare indusă pentru funcționarea la mers în gol cu $l_m = 28 \text{ mm}$ este $U_{l_m 28} = 159.38 \text{ V}$, iar pentru $l_m = 32 \text{ mm}$ valoarea tensiunii este $U_{l_m 32} = 170.12 \text{ V}$.

Un alt studiu experimental realizat în acest capitol se referă la posibilitatea obținerii unui efect de saliență inversă prin introducerea unor piese feromagnetice în spațiul interpolar din rotor în scopul îmbunătățirii caracteristicii externe și realizării unui reglaj a tensiunii trecând peste dezavantajul absenței controlului asupra câmpului magnetic. Pornind de la aceste considerente a fost modificată în OPERA structura rotorului Prototipului 1 prin introducerea mai multor straturi de piese interpolare între magneții dispuși radial pe suprafața rotorului. Rezultatele obținute în urma modificărilor sunt comparate cu cele obținute la prototipul inițial. Din punct de vedere al spectrului câmpului magnetic, al distribuției densității fluxului magnetic în întrefier la starea de repaus a rotorului și al caracteristicilor externe obținute și comparate pentru cele două cazuri s-a concluzionat faptul că introducerea pieselor feromagnetice în spațiul interpolar nu are un efect semnificativ în ceea ce privește îmbunătățirea performanțelor generatorului sincron studiat deoarece generatorul are un număr mare de poli și în consecință un pas polar mic, această soluție fiind avantajoasă doar în cazul generatoarelor cu un număr mic de poli [8][9].

Rezultatele acestui studiu cu metoda elementului finit se constituie într-o contribuție a tezei și anume că îmbunătățirea caracteristicii externe la GSMP prin introducerea de piese interpolare, care de regulă produc efectul de „saliență inversă”, nu se poate aplica în cazul analizat și în general nici pentru GSMP cu turație scăzută și număr mare de poli.

Capitolul 5. Determinări experimentale și comparații cu mărimile calculate

Prototipul studiat este destinat aplicațiilor de conversie a energiei eoliene, dar și a energiei hidraulice în energie electrică. Ca mod de funcționare, acesta poate funcționa atât conectat la rețea, dar se pretează în special pentru funcționarea în regim autonom. Pentru generatoarele destinate funcționării în regim autonom interesul încercărilor experimentale îl reprezintă determinarea caracteristicilor de funcționare, acest lucru reprezentând și scopul principal pentru care a fost conceput standul experimental din laboratorul de Mașini Electrice D109 al Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Universitatea „Politehnica” Timișoara.

În acest capitol au fost prezentate standul experimental și sistemul de achiziție și prelucrare a datelor cu ajutorul cărora au putut fi realizate determinările experimentale propuse pentru generatorul sincron cu magneți permanenți studiat. Astfel au fost prezentate valorile parametrilor rezultați din determinările experimentale pe standul de probă. De asemenea a fost realizată analiza comparativă a rezultatelor obținute experimental cu cele obținute pe cale analitică din calculul bazat pe metoda elementului finit în mediul OPERA. În urma comparației s-a constatat faptul că există o bună similitudine între valorile parametrilor obținute din simulări și cele obținute în urma încercărilor pe standul de probă, precum și între formele de undă ale tensiunilor rezultate din calculul numeric și cele din măsurători directe.

Capitolul 6. Analiza unei variante constructive de generator sincron cu magneți permanenți 5kVA – Prototip 2

În acest capitol a fost prezentat cel de-al doilea prototip de generator sincron cu

magneți permanenți cu turație scăzută care este diferit față de primul prototip studiat din punct de vedere constructiv prin numărul de creștături statorice. Modelul Prototipului 2 caracterizat de un număr de 63 de creștături a fost construit în OPERA și au fost apoi determinate analitic distribuția fluxului magnetic, valoarea inducției magnetice în întrefier, formele de undă pentru tensiunea electromotoare indusă în înfășurările statorice și cuplul parazit al generatorului pentru turația nominală $n_N = 120 \text{ rpm}$.

De asemenea a fost prezentată o analiză comparativă între două generatoare cu magneți permanenți și turație scăzută, de aceeași putere nominală, asemănătoare din punct de vedere constructiv, caracterizate de o structură simplă, principala deosebire fiind topologia statorului.

Din punct de vedere al performanțelor funcționale ambele generatoare oferă rezultate bune. Prin comparația tensiunilor electromotoare induse la funcționarea în gol și la turație nominală a rotorului s-a dovedit că Prototipul 2 este mai performant decât Prototipul 1. În ceea ce privește stabilitatea celor două generatoare la variații ale sarcinilor, în urma comparației caracteristicilor externe ale celor două prototipuri s-a constatat că valoarea tensiunii la bornele Prototipului 2 este mai mare decât valoarea tensiunii la bornele Prototipului 1 pentru aceeași valoare a rezistenței de sarcină. Deci și din acest punct de vedere Prototipul 2 are o comportare mai bună.

În ceea ce privește un alt parametru important al generatoarelor sincrone cu magneți permanenți, și anume cuplul parazit, s-a constatat faptul că ambele prototipuri sunt caracterizate de valori mici ale acestuia. Comparativ, pe baza valorilor obținute în OPERA, Prototipul 2 oferă un avantaj față de Prototipul 1, prezentând un cuplu parazit mult mai redus și automat un nivel de zgomot acustic și de vibrații mai scăzut. Deoarece ambele prototipuri sunt mașini de putere mică, efectele parazite precum forțele magnetice dezechilibrante și zgomotele acustice cauzate de către cuplul parazit se încadrează la niveluri acceptabile. Ca urmare și din acest punct de vedere al valorii cuplului parazit Prototipul 2 este mai bun.

O altă concluzie importantă care reiese din această analiza confirmă faptul că valorile c.m.m.m.c. reprezintă un indiciu foarte bun pentru faza de proiectare a unui generator sincron cu magneți permanenți în ceea ce privește controlul cuplului parazit. În cazul de față se consideră că valorile c.m.m.m.c. alese pentru cele două generatoare sunt prea mari, și chiar dacă au condus la diminuarea aproape completă a cuplului parazit au apărut în consecință forțe magnetice unilaterale. Din acest punct de vedere se consideră că valori cuprinse între 500-800 ale c.m.m.m.c. sunt suficient de mari pentru menținerea unui cuplu parazit la un nivel acceptabil. Astfel la alegerea numărului de creștături trebuie avută în vedere menținerea unui echilibru în ceea ce privește obținerea unui cuplu parazit la nivel acceptabil și apariția altor efecte parazite precum forțele de atracție magnetică unilaterală.

Capitolul 7. Analiza performanțelor unui generator sincron trifazat cu magneți permanenți și piese feromagnetice interpolate

Acest capitol este dedicat analizei unui generator sincron trifazat cu magneți permanenți de NdFeB inserați în rotor având ca scop evidențierea efectului de saliență inversă al rotorului în cazul în care acesta este construit cu un număr mic de poli.

Datorită numărului mic de poli se dorește a se demonstra faptul că la acest tip de structură a rotorului are loc efectul de saliență inversă, caz în care reactanța axei de cuadratură q este mai mare decât reactanța axei directe d . Ca urmare a acestui efect, generatorul prezintă o capacitate de compensare proprie a tensiunii pentru menținerea tensiunii la borne aproape constantă la diferite încărcări de sarcină.

Sunt prezentate caracteristicile și performanțele obținute cu ajutorul OPERA pe baza metodei elementului finit și evidențiate beneficiile acestui tip de generator pentru aplicațiile în care este necesară menținerea tensiunii de ieșire aproape constantă, indiferent de sarcina de

încarcare, cum ar fi de exemplu funcționarea generatorului în regim autonom.

Prin numeroasele simulări efectuate s-a dovedit faptul că introducerea pieselor feromagnetice în spațiul interpolar are efect pozitiv doar în cazul generatoarelor sincrone cu un număr mic de poli, cazul analizat în acest capitol, spre deosebire de GS cu număr mare de poli precum este cazul Prototipului 1 studiat, cu 33 de creștături, unde s-a observat că această soluție produce un efect nesemnificativ în ceea ce privește caracteristica externă a generatorului.

Rezultatele prezentate demonstrează că acest tip de generator sincron cu magneți permanenți inserați în rotor prezintă o capacitate de compensare proprie a tensiunii, performanțele sale reprezentând un avantaj semnificativ al generatorului pentru utilizarea în aplicații cu funcționare autonomă. În acest caz un astfel de GS devine o soluție adecvată și economică într-un sistem de alimentare, în special la cele cu factor de putere unitar, deoarece nu necesită un sistem suplimentar de reglare a tensiunii.

Concluzia practică finală care rezultă din acest capitol este că în cazul prototipurilor studiate 1 și 2 nu se poate obține o îmbunătățire a caracteristicii externe prin introducerea de piese feromagnetice în spațiul interpolar, deoarece aceste două prototipuri au un număr prea mare de poli. Așadar, în general în cazul generatoarelor sincrone cu magneți permanenți cu turație scăzută nu este recomandabilă această soluție constructivă.

Capitolul 8. Concluzii generale, contribuții și direcții de dezvoltare ulterioară

În capitolul acesta sunt prezentate concluziile rezultate în urma studiilor efectuate, contribuțiile personale în cadrul acestei teze și direcțiile de dezvoltare ulterioară a cercetării abordate în teză.

Ca urmare a activităților și cercetărilor desfășurate în domeniul abordat, se consideră faptul că au fost aduse următoarele contribuții:

1. Analiza teoretică și verificarea experimentală a unui prototip de generator sincron cu magneți permanenți montați pe suprafața rotorului și un număr foarte mic de creștături pe pol și fază în stator ($q=0.34$) – Prototip 1.
2. Analiza teoretică și verificarea experimentală a unui prototip de generator sincron cu magneți permanenți montați pe suprafața rotorului și un număr mic de creștături pe pol și fază în stator ($q=0.65$) – Prototip 2.
3. Verificarea experimentală a influenței numărului de creștături asupra cuplurilor parazite de tip “cogging” la generatorul sincron cu magneți permanenți montați pe suprafața rotorului.
4. Comparatie între Prototipul 1 și Prototipul 2 și formularea unor concluzii utile pentru proiectarea de serie a generatoarelor sincrone cu magneți permanenți.
5. Studiul posibilităților de îmbunătățire a caracteristicilor externe prin metode constructive, precum introducerea de piese feromagnetice în spațiul dintre magneții de pe rotor.

Cercetările prezentate în teză pot fi dezvoltate în continuare în următoarele direcții:

- studiul forțelor unilaterale prin metoda elementului finit pentru GSMP cu număr mic de creștături pe pol și fază;
- determinarea unui criteriu de alegere a înfășurării statorice (a numărului de creștături pe pol și fază) care să constituie un compromis pentru valori acceptabile ale cuplului parazit “cogging” și ale forțelor unilaterale;
- studiul funcționării GSMP în sarcină nesimetrică; caracteristici de funcționare;
- simularea numerică și studiul experimental al regimurilor tranzitorii [9][10][11][12][13].

Referințe bibliografice selectate

- [1] Youssef Errami, Mohammed Ouassaid, Mohamed Maaroufi, *Modelling and optimal power control for permanent magnet synchronous generator wind turbine system connected to utility grid with fault conditions*, World Journal of Modelling and Simulation, Vol. 11 (2015) No. 2, pp. 123-135, ISSN 1 746-7233, England, UK
- [2] John Bird, *Electrical and Electronic Principles and Technology – Fifth edition*, Routledge, Taylor&Francis Group, London and New York, 2014
- [3] R. Saou, M. E. Zaim, K. Alitouche, *Modelling and Design of a Low Speed Flux Reversal Machine*, Journal of Electrical Systems, pp. 18-23, 2009
- [4] Mihai Chirca, Claudiu Oprea, Petre-Dorel Teodosescu, Ștefan Breban, *Optimal Design of a Radial Flux Spoke-Type Interior Rotor Permanent Magnet Generator for Micro-Wind Turbine Applications*, Department of Electrical Machines and Drives Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 2016
- [5] Mohammadali Abbasian, Arash Hassanpour Isfahani, *Optimal Design of a Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems*, Journal of Magnetics 16(4), 379-385, 2011
- [6] Tong Wei, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, WIT Press, Southampton, UK, 2010
- [7] Opera Simulation Software – Cobham Technical Services, *Electrical Machines Design*, Kidlington, Oxfordshire, UK, 2015
- [8] Constantin Dobrean, Marian Greconici, Gheorghe Madescu, Marțian Moț, Marius Biriescu, *FEM Analysis of a Synchronous Generator with Inset Permanent Magnet Rotor*, International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 978-1-5090-4488-7/17/\$31.00 ©2017 IEEE, Brașov, 2017
- [9] Marian Greconici, Gheorghe Madescu, Marțian Moț, Marius Biriescu, Danijela Milosevici, *Analisis of a PM Generator with Inset Magnets*, 2018 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timisoara, Romania, DOI: 10.1109/ISETC.2018.8583943
- [10] D. Bang, H.Polinder, G. Shrestha, J.A. Ferreira, *Review of Generator Systems for Direct-Drive Wind Turbines*, Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition, Belgium, 2008
- [11] Ion Boldea, *Synchronous Generators (Second Edition)*, CRC, Taylor&Francis Group, 2016
- [12] IEEE Std. 115-1995, IEEE, Part II, Sec. 12, *Standstill frequency – respons testing*
- [13] BS 4999: Part 104: 1988, British Standard, *General Requirement for rotating electrical machines. Part 104. Methods of test for determining synchronous machines quantities*