

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Elektrotehnika instituut

ATM70LT

Norman Korn

**SmCo JA NdFeB PÜSIMAGNETITEGA  
AEGLA SEKÄIGULISTE GENERAATORITE  
VÕRDLUSANALÜÜS**

Magistritöö

Instituudi direktor .....professor Tõnu Lehtla

Juhendajad .....assistent Toomas Vaimann

.....teadur Ants Kallaste

Lõpetaja .....Norman Korn

Tallinn 2014

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsenseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 6.05.2014.a.

..... Norman Korn

ATM70LT

## **SmCo ja NdFeB püsिमagnetitega aeglasekäiguliste generaatorite võrdlusanalüüs**

**Norman Korn**, üliõpilaskood 122373AAAM, mai 2014. – 55 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond

Elektrotehnika instituut, elektrimasinate õppetool

Töö juhendajad: assistent Toomas Vaimann, teadur Ants Kallaste

**Võtmesõnad:** püsिमagnetid, NdFeB, SmCo, sünkroongeneraator, tuulegeneraator

### **Referaat:**

Lõputöö on 55 lehel, sisaldab 2 tabelit ja 32 joonist.

Lõputöö eesmärgiks oli katsetada ja võrrelda SmCo (samaarium koobalt) ja NdFeB (neodüüm raud boor) püsिमagnetgeneraatoreid. Katsetused viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli elektrimasinate laboris. Katseseadmeks oli uurdevaba püsिमagnetitega aeglasekäiguline sünkroongeneraator.

Mõlema rootoriga sooritati tühijooksu- ja koormuskatsetused. Tühijooksukatsetel mõõdeti faasipingeid erinevatel pöörlemiskiirustel. Koormuskatsetel sooritati katsed nimipöörlemiskiirusel 230 p/min, koormates kõiki kolme faasi võrdsete aktiivkoormustega, samal ajal mõõtes väljundpingeid ning -voolusid. Lisaks on mõõdetud mõlemal seadmel magnetvoo tihedus õhupilus.

Mõõtetulemuste võrdlemiseks on tehtud vastavad arvutused ning ka FEM analüüs. Joonistel on näidatud saadud tulemused.

ATM70LT

**Сравнительный анализ тихоходных генераторов с постоянными SmCo и NdFeB магнитами.**

**Норман Корн**, код студента 122373AAAM, май 2014. – 46стр.

ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ \*Энергетический факультет

Электротехнический институт

Кафедра электрических машин

Руководители работы: ассистент Тоомас Вайманн, научный сотрудник Антс Калласте

**Ключевые слова:** постоянные магниты, NdFeB, SmCo, синхронный генератор, ветряной генератор.

**Реферат:**

Дипломная работа состоит из 46 листов, содержит 2 таблицы и 32 рисунка.

Целью дипломной работы является исследование и сравнение постоянно-магнитных генераторов, состоящих из самарий-кобальтовых (SmCo) магнитов и неодимовых (сплав неодима, железа и бора NdFeB) магнитов. Исследования проводились в лаборатории электрических машин Таллинского Технического Университета.

Испытания проводились с беззазорным тихоходным синхронным генератором.

Исследовалась работа ротора как на холостом ходу, так и под нагрузкой. Во время холостого хода измерялись фазовые напряжения при различных скоростях вращения. Под нагрузкой (выполняли при номинальной скорости вращения 230 об./мин.) нагружали все три фазы равными активными нагрузками, при этом измерялись выходные напряжения и токи. Дополнительно измерялась плотность магнитного потока в воздушном зазоре в обоих случаях.

Результаты измерений сравнивали с расчетными и полученными путем анализа МКЭ.

На рисунках показаны полученные результаты .



ATM70LT

**Comparative study of slow-speed generators using SmCo and NdFeB permanent magnets**

**Norman Korn**, student code 122373AAAMM, May 2014. – 55 pages

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY \* Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Chair of Electrical Machines

Tutors of the work: assistant Toomas Vaimann, researcher Ants Kallaste

**Keywords:** permanent magnets, NdFeB, SmCo, synchronous generator, wind generator

**Summary:**

A thesis is presented on 55 pages that includes 2 table and 32 figures.

The purpose of the thesis is to investigate and compare SmCo and NdFeB permanent magnet generators. The experiments were carried out in the Tallinn University of Technology electrical machines laboratory. The test fixture was slow-speed slotless permanent magnet synchronous generator.

No-load and load tests were performed with both rotors. During no-load test phase voltages were measured at different rotating speeds. In load test phase voltages and currents were measured at rated speed 230 rpm, applying different equal loads to all three phases. Air gap magnetic flux in the generator was measured in an additional test.

The measured results are compared with calculations and FEM analysis results. Results are shown on the figures.

# SISUKORD

Magistritöö ülesanne .....	8
1. Eessõna.....	9
2. Sissejuhatus .....	10
3. Teoreetiline taust püsिमagnetmasinatest.....	12
3.1 Püsिमagnetid .....	12
3.2 Püsिमagnetmasinad .....	13
4. Püsिमagnetmasinate kasutamine tuulikutes .....	15
4.1 Tuuleenergia kasutamise ajalugu ja areng .....	15
4.2 Tuulegeneraatorite klassid ja liigid .....	15
4.3 Püsिमagnetite kasutamine tuulegeneraatorites.....	19
5. Teoreetiline taust SmCo ja NdFeB magnetitest .....	20
5.1 Magnetite hind ja turg .....	20
5.2 Neodüüm-raud-boor .....	22
5.2.1 NdFeB magnetmaterjali eelised ja puudused.....	23
5.3 Samaarium-koobalt .....	24
5.3.1 SmCo magnetmaterjali eelised ja puudused .....	24
6. Generaator .....	25
6.1 Katseseade ja katsetuste kirjeldus .....	25
6.2 Püsिमagnetid .....	27
6.3 Arvutused .....	28
6.3.1 Magnetvoo arvutused.....	28
6.3.2 FEM analüüs .....	31
6.3.3 Elektriliste parameetrite arvutused .....	32
7. SmCo generaatori katsetused laboris .....	36
7.1 Magnetvoo mõõtmine õhupilus.....	36
7.2 Tühijooksukatsetus.....	36
7.3 Koormuskatsetus .....	37
8. NdFeBgeneraatori katsetused laboris.....	38
8.1 Magnetvoo mõõtmine õhupilus.....	38
8.2 Tühijooksukatsetus.....	38
8.3 Koormuskatsetus .....	39
9. Kahe masina omavaheline võrdlus.....	40

9.1 Magnetvootihedus õhupilus .....	40
9.2 Tühijooksukatsetused .....	41
9.3 Koormuskatsetused .....	42
10. Kokkuvõte .....	44
Kasutatud kirjandus .....	45
Lisa 1 .....	48
Lisa 2 .....	52

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2014

**MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE**

Norman Korn, üliõpilaskood 122373AAAMM

Magistritöö teema: SmCo ja NdFeB püsिमagnetitega aeglasekäiguliste generaatorite võrdlusanalüüs

Ülesanne: Katsetada ja võrrelda SmCo ja NdFeB püsिमagnetgeneraatoreid

Lähteandmed:

1. Eelnevalt tehtud uuringud samal teemal
2. Elektrimasinate ja magnetite erialane kirjandus
3. Katseseade

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

1. Ülevaade püsिमagnetmasinatest
2. Ülevaade püsिमagnetmasinate kasutamisest tuulikutes
3. Ülevaade SmCo ja NdFeB magnetitest
4. SmCo generaatori katsetused
5. NdFeB generaatori katsetused
6. Kahe masina omavaheline võrdlus

Magistritöö esitada eesti keeles kahes eksemplaris koos eesti- ja kahe võõrkeelse referaadiga hiljemalt 09.06.2014.

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Assistent Toomas Vaimann.....

Üliõpilane Norman Korn .....

## 1. EESSÕNA

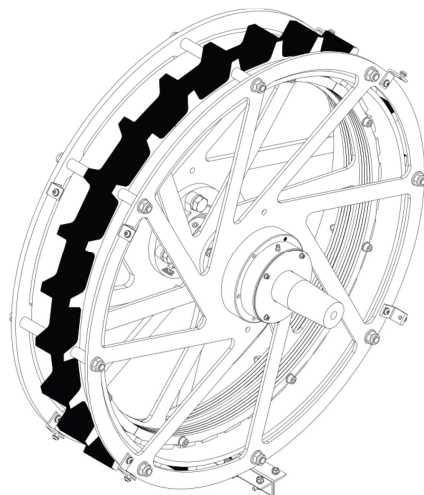
Lõputöö teema on välja antud Tallinna Tehnikaülikooli energeetikateaduskonna elektrotehnika instituudi algatusel. Tööks vajalikud katsetused sooritati Tallinna Tehnikaülikooli elektrimasinate laboris katseseadmega, mis on valminud koostöös ettevõttega My!Wind Llc. Juhendajad, assistent Toomas Vaimann ja teadur Ants Kallaste, abistasid konsultatsioonidega. Katsetusi aitas läbi viia kursusekaaslane Rait Kangro.

## 2. SISSEJUHATUS

Tänapäeval liigub maailm üha enam taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise suunas. Märkimisväärne osa Eesti taastuvenergiast tuleb tuuleenergiast. Eesti Energia taastuvenergia tootmismahust moodustab tuuleenergia 73%. 2014. aastal on see 45 GWh ja aastaks 2020 on prognoositud, et see kasvab 220 GWh-ni [1]. Tuuleenergia kasutamise suur kasv on toonud kaasa tuulegeneraatorites kasutatavate elektrimasinate arengu.

Tuulegeneraatorite tüüpe on mitmeid. Vanim ja siiani enim kasutatud on asünkroon-generaator [2]. See lahendus vajab tavaliselt reduktori kasutamist, mis vähendab tuulegeneraatori vastupidavust. Seetõttu on hakatud rohkem tähelepanu pöörama otsetoimelistele tuulegeneraatoritele.

Maailmas tegeletakse palju erinevate otsetoimeliste tuulegeneraatorite uurimisega ja arendamisega. Otsitakse uusi ja erinevaid lahendusi, millest on kirjutatud mitmeid artikleid [3-8]. Käesolev töö põhineb eelnevalt projekteeritud ja välja arendatud generaatoril, millest on kirjutatud vastav doktoritöö [9]. Uuritav seade on aeglasekäiguline generaator, millel pole tiiviku ja generaatori vahel reduktorit ning selle nimipöörlemiskiirus on 230 p/min ja nimivõimsus on 5 kW. Illustreeriv pilt katseseadmest on esitatud joonisel 2.1.



Joonis 2.1. Illustratsioon prototüüpmasinast [3]

Magistritöö ülesanne on uurida aeglasekäigulist püsिमagnetgeneraatorit, kasutades neodüüm-raud-boor (NdFeB) ja samaarium-koobalt (SmCo) püsिमagnetitega rootorit. Mõlemad

generaatori rootorid on projekteeritud selliselt, et seadme väljundvõimsus ja faasipinge oleksid erinevate rootorite kasutamise puhul ühesugused. Töös uuritakse mõlema magneti teoreetilist tausta, ajalugu, hindade muutumist ning tuuakse välja eelised ja puudused. Uuritava seadmega viiakse läbi katsetused ning võrreldakse mõlema masina mõõdetud ja arvutatud tulemusi.

Katsetused on läbi viidud Tallinna Tehnikaülikooli elektrimasinate laboris. Et arvutada seadme faasipinget teatud pöörlemiskiirusel, tuleb teada õhupilus olevat magnetvoogu. Selleks on mõõdetud seisva seadmega magnetvootihedus õhupilus ning lisaks arvutatud nii analüütilisel kui ka lõplike elementide meetodil. Viimase variandi puhul on kasutatud vabavara programmi FEMM 4.2 [10]. Kõik arvutused ja simulatsioonid on toodud välja kuuendas peatükis.

Seitsmendas peatükis on toodud välja katsetulemused SmCo rooriga. Kõigepealt on mõõdetud magnetvootihedus, seejärel seadme pinged tühijooksul. Tühijooksukatsetus on viidud läbi selleks, et veenduda kõikide faaside korrektses ühendatuses ning liinipingete sümmeetrilisuses. Lisaks on näha, kas masina pinged vastavad arvutatud tulemustele. Pärast tühijooksukatsetust on tehtud koormuskatsetused, mis uurivad väljundparameetrite muutust ning generaatori käitumist koormamisel. Koormuskatsetus sooritati nimipöörlemiskiirusel 230 p/min, koormates kõiki kolme faasi võrdsete aktiivkoormustega. Kuna katseseadmepool ei olnud loomulikku ega sundjahutust, siis mähiste ülekuumenemise vältimiseks lõpetati koormuskatsetus 4 kW juures. Kaheksandas peatükis on toodud välja katsetulemused NdFeB rooriga. Selle seadmega on tehtud samuti nii magnetvootiheduse mõõtmised, tühijooksukatsetus kui ka koormuskatsetus. Kõik tulemused on toodud välja joonistel.

Üheksandas peatükis tuuakse välja kõik tulemused, mis on saadud arvutuste ning mõõtmiste kaudu. Võrreldakse tulemusi graafikutes ning tuuakse välja sarnasuste ja erinevuste põhjused. Tulemustest lähtub, kas seadme väljundparameetrid vastavad algselt projekteeritutele. Kui mitte, siis selgitatakse, millest tulenevad erinevused.

Lisa 1 all on toodud välja töö käigus valminud teadusartikkel SmCo püsिमagnetgeneraatori projekteerimisest. Lisa 2 all on hetkel veel ilmumata teadusartikkel SmCo ja NdFeB aeglasekäiguliste püsिमagnetgeneraatorite võrdlusanalüüsist, mis on samuti valminud lõputöö teostamise käigus. Lõputöös käsitletud teema kattub artikli teemaga.

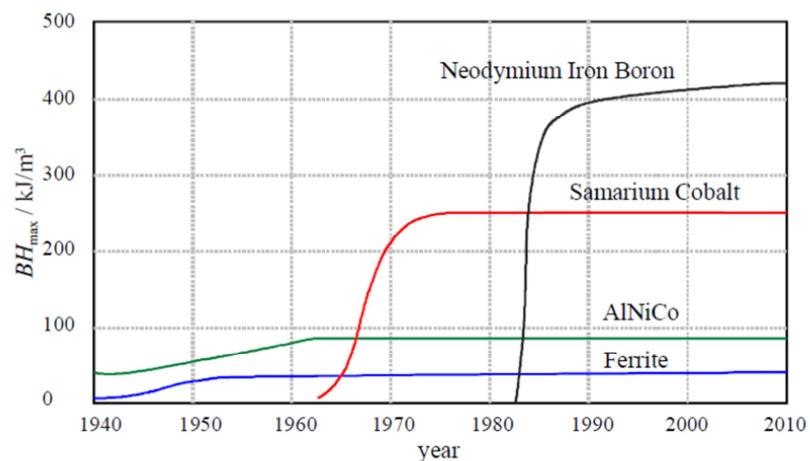
### 3. TEOREETILINE TAUST PÜSIMAGNETMASINATEST

#### 3.1 Püsimagnetid

Püsimagnetmaterjalid, tänu oma omadustele, on leidnud laialdast kasutamist nii transpordis, tööstuses, sõjaväes kui ka kosmosesüsteemides. Püsimagnetmaterjale on läbi sajandite pidevalt arendatud, mille tulemusel on magnetite omadused tunduvalt paranenud ja nende kasutamine on sellega märgatavalt kasvanud.

Püsimagnetite (PM) avastamine toimus juba tuhandeid aastaid enne meie ajaarvamist. Esimesed allikad, kus on kirjeldatud püsimagnetite kasutamist, on Hiina kroonikad. Seal on mainitud, et esimesi kompasid kasutati kõrbete ületamiseks: savipotis ujus vee peal kork, mille külge oli pandud magnetiseeritud raud. Sealt edasi jõudis kompass meremeeste kätte, kus seda rakendati merel navigeerimiseks. Esimestest tehniliselt toodetud terasnäeladest on kirjutatud 13. sajandil. [11]

Esimene tohutu edenemine PM materjalide vallas toimus 20. sajandil tänu alumiinium-nikkel-koobalt-raud materjalide arengule. Selliseid magnetiteid nimetatakse ka metall-magnetiteks. Teine suur grupp PM materjale töötati välja 1940ndatel Philips'i organisatsioonis ja nendeks olid ferriitmagnetid. Nendel ferriitidel või keraamilistel materjalidel on magnetilised omadused ferriit-magnetismi nähtuse tõttu (mõnede Fe ionide magnetmomendid on antiparalleelsed teistega), kus metall-magnetite omadused on tingitud ferromagnetismist. Kolmas suur grupp 20. sajandil välja töötatud PM materjale põhinevad haruldastel muldmetall-elementidel, nagu samaarium, tseerium, ütrium, praseodüüm, neodüüm, gadoliinium jt. [11,12]



Joonis 1.1. Maksimaalse energiatiheduse areng püsimagnetmaterjalidel aastate lõikes [13]



Tänu haruldase muldmetallmagnet-materjalidele suurele energiatihedusele on püsिमagnet-materjalid leidnud ka rakendamist suure võimsusega elektrimasinates, näiteks megavattklassi tuulegeneraatorites. Joonis 1.1 illustreerib enimlevinud püsिमagnetmaterjalide maksimaalse energiatiheduse arengut viimase seitsme aastakümne jooksul. Kõige tuntum ja enamkasutatud muldmetallmagnet on NdFeB. Tema energiatihedus on veidi kõrgem kui SmCo oma, kuid temperatuuritaluvus on madalam. Lisaks on veel kasutusel AlNiCo ja ferriitmagnetid. Nende nelja magnetmaterjali tehnilised parameetrid on välja toodud tabelis 1.1.

Tabel 1.1 Erinevate püsिमagnetmaterjalide omadused [14]

	$BH_{max}(\text{kJ/m}^3)$	$B_r(\text{T})$	$H_c(\text{kA/m})$
<b>NdFeB</b>	220...500	0,97...1,45	740...1000
<b>SmCo</b>	120...240	0,85...1,1	620...840
<b>Ferriit</b>	7...42	0,2...0,48	120...360
<b>AlNiCo</b>	10...35	0,6...1,16	40...120

Püsिमagnetite valimisel jälgitakse kolme peamist parameetrit, mis on välja toodud tabelis 1.1. Need on:  $BH_{max}$  – energiatihedus,  $B_r$  – jääkmagnetvoo tihedus,  $H_c$  –koertsetiivjõud. Lisaks jälgitakse magneti temperatuuritaluvust.

### 3.2 Püsिमagnetmasinad

Püsिमagnetid leidsid rakendamist elektrimasinates juba 19. sajandil, kus neid kasutati masina ergutussüsteemis. Kuna sel ajal olid kasutusel väga nõrgad magnetmaterjalid, nagu teras või volfram-teras, siis nende energiatihedus oli madal ja neid kasutati vähe. Peatselt mindi üle elektromagnetilisele ergastussüsteemile. 1932. aastal välja töötatud AlNiCo magnetid töid elektrimasinatesse tagasi PM ergutussüsteemi, aga selle kasutus oli algul piiratud. [15]

20. sajandil kujunes kõige populaarsemaks mootoriks asünkroonmootor. Tänu jõuelektronika ja automaatika arengule on nende kasutamine tänapäevaks märgatavalt laienenud. Tüüpiliselt jääb asünkroonmasina väljundvõimus 70 W ja 500 kW vahele ning 75% nendest töötab kiirusel 1500 p/min. Asünkroonmootori peamiseks eeliseks on tema lihtne konstruktsioon, odav hooldus, kommutaatori ja harjade puudumine, odav hind ning vastupidavus. Puudusteks on väike õhupilu ja madalam kasutegur võrreldes sünkroonmootoritega. [15]

Muldmetallmagnetite arenguga on kommutatsioonivabad mootorid muutunud eelistatumaks kui asünkroonmootorid. Muldmetallpüsिमagnetid tõstavad mootori jõudlust, võimsuse ja massi suhet, dünaamilist jõudlust ning kvaliteeti. Kuna selliste magnetite hind on langemas, siis on PM mootorid muutumas aina populaarsemaks. Arengud, mis on tehtud pooljuhtajamite valdkonnas, on teinud harjadeta mootori kontrollimise lihtsamaks ja tasuvamaks ning andnud võimaluse neid kontrollida suurel kiirusevahemikul, säilitades head kasutegurit. [15]

Harjadeta PM mootori magnetid on paigaldatud rootorile ja ankrumähis staatorile. Sellega ei ole ankruvool juhitud läbi kommutaatori või libistusrõngaste, mis vajavad kõige tihemini hooldust, kuna kuluvad mehaanilise hõõrdumise tõttu. 90% mootorite hooldusest ongi seotud liugkontaktidega. Praktiliselt kõik PM mootori võimsuskaod tekivad staatoris. Sealt saab soojust vähese vaevata eemale juhtida kas jahutusribidega korpusel või suurematel masinatel vesijahutusega. [15]

## **4. PÜSIMAGNETMASINATE KASUTAMINE TUULIKUTES**

### **4.1 Tuuleenergia kasutamise ajalugu ja areng**

Tuuleenergia juured ulatuvad umbes 3000 aasta tagusesse aega. Konstruktsioonid, mis sarnanevad kaasaegsetele tuulikutele, pärinevad Hiinast, Pärsiast ning Tiibetist ning need loodi 10. sajandil. Kesk-Aasiast leidsid need lahendused tee Euroopasse tänu ristisõdadele. Euroopas oli tuulikute tippaeg 19. sajandil, kui näiteks Hollandi tööstuses saadi 90% vajaminevast energiast tuulest. Põhja-Ameerikas hakkasid tuulikud kärmesti levima 20. sajandi alguses, kus tuulikute abil pumbati kariloomadele puhast vett. 20. sajandi esimese kvartali lõpuks oli Põhja-Ameerikas püsti pandud ligi 600 000 tuulikut ning paljud sarnased tuulikud töötavad praegugi. [16]

Tuulejõutehnoloogiate tormiline areng ja üleilmselt paigaldatud tuulejõu tootmiseadmete mahu suurenemine on viinud erinevate tuuleturbiinide kontseptsioonide välja töötamiseni. Tänapäeva tuulikud on jaotatud nende kontrollfunktsioonide ja jõuülekandeseadmete tüüpide järgi ning neil on nii tugevaid kui nõrku külgi. Tuuleturbiinide edu tulevikus võib tugevalt sõltuda nende võimest adapteeruda nii turuootuste kui kommunaalteenuste ettevõtete nõuetega. [17]

Tuulegeneraatori pöörlemiskiirus ja võimsus sõltub tuuleturbiinist, viimase atribuudid sõltuvad tuuliku labade ehitusest ja võimsusest. Megavatt-klassi tuulikute pöörlemiskiirus jääb vahemikku 10...40 p/min. Samas on see väiksematel turbiinidel suurem, näiteks 30kW tuulikul on pöörlemiskiiruseks 80...100 p/min, 5 kW tuulik võib pöörelda 200...220 p/min. [9]

### **4.2 Tuulegeneraatorite klassid ja liigid**

Püsिमagnetite tehnoloogia pakub palju erinevaid võimalusi masinate konstrueerimiseks. Neodüüm-raud-boor (NdFeB) magnetid on sel turul domineerivad. Püsिमagnetgeneraatorite kasutus kogub populaarsust ka tuulegeneraatorites. Püsिमagnetgeneraatorid pakuvad energiasäästlikke eeliseid, mis teevad nad tuulegeneraatorites atraktiivseks. PM tehnoloogia annab tõhusaid elektromagnetilisi ja konstruktsioonilisi võimalusi, võimaldades konstrueerida näiteks suure jõudlusega mitmepooluselisi masinaid või välise rootoriga süsteeme. Saavutatav on ka suur kasutegur ning suur pöördemoment mahuühiku kohta, kui kasutada püsिमagneti ergutust, kuid õige magnetimaterjali valik on eeldus heade tulemuste saavutamiseks.

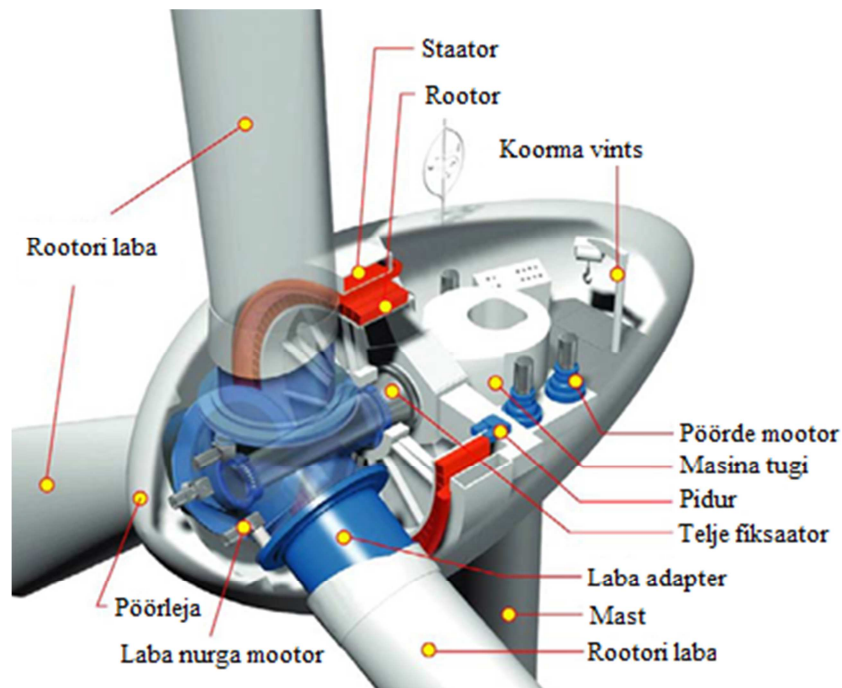
Praktikas on kolme sorti PM masinaid, mida tuulikutes rakendatakse [13]:

- 1) otseülekandega generaatorid (10...20 p/min)
- 2) keskmise kiirusega generaatorid (100...300 p/min)
- 3) suure kiirusega generaatorid (1000...3000 p/min)

Alates 1991. aastast on olnud tootjaid, kes kasutavad otse tuuleturbiini võllile ühendatud aeglasekäigulisi elektrigeneraatoreid, põhiliselt käigukastide rikete vältimiseks ja hooldusvajaduse vähendamiseks. Antud tüüpi generaatori ehitust on näha joonisel 4.1. Selliste generaatorite jaoks on vajalik muundur, mis võimaldab tuulikul töötada optimaalsel tootlikkuskõveral ning ühendada tuulikut võrku. Madala kiirusega (10...25 p/min) ja suure pöördemomendiga tuuleturbiinid ja muundurid on küllaltki suured, rasked ja kallid. Kui tuulekiirus ületab tuuliku nimikiirust, pööratakse tuuliku labad paralleelseks tuule suunaga ning võimsus väheneb. Suur osa praeguseid otsetoimelisi generaatoreid on elektromagnetitega sünkroongeneraatorid. Elektromagnetite eeliseks PM ees on see, et masina ergutust saab juhtida. See võimaldab vähendada rauaskadusid väikestel tuulekiirustel. Madalal tuulekiirusel saab tuulegeneraator toota energiat, suurel aga hoida pinget nimiväärtuses. Nii pole vajalik muunduri ülehindamine, et kasutada suuremaid kiirusi kui nimikiirus. [18]

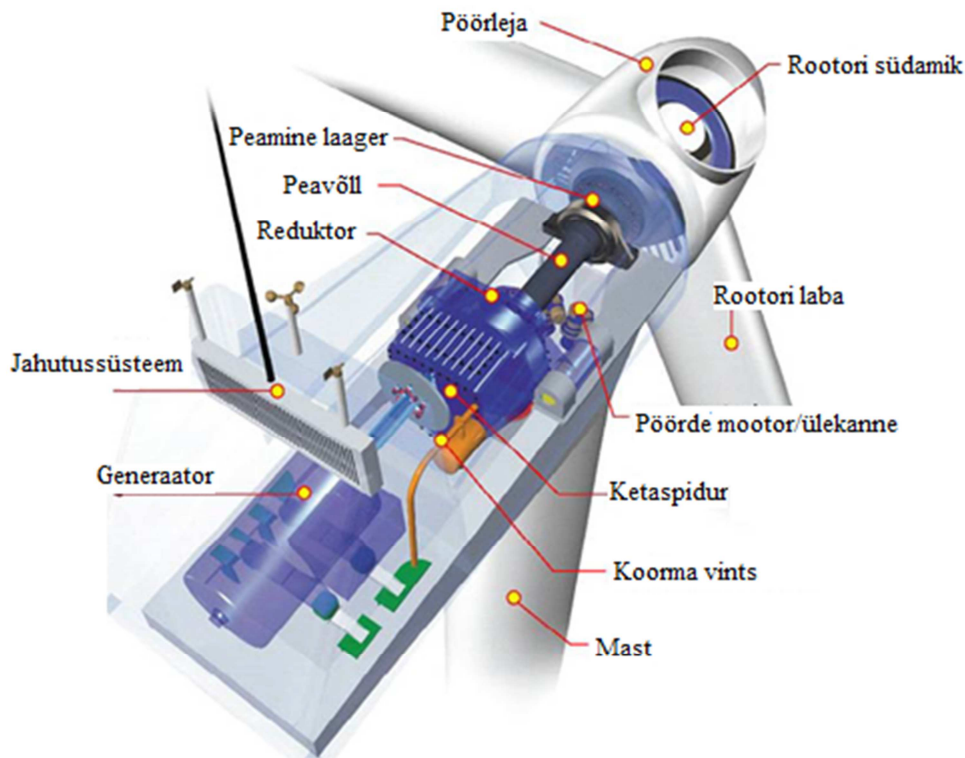
Aeglasekäigulised tuulegeneraatorid pöörlevad 3...5 MW võimsuse juures nimipunktis ainult 12...15 p/min. See kiirus on nii madal, et elektrimasin ei saavuta enam head tasakaalu rauas- ja vasekadude vahel. Vaseskaod domineerivad ja tõhusus on madalam.

Kasutades otsetoimeliste tuulegeneraatorite kontseptsiooni, on vaja võrdlemisi suurt püsimagnetmasinat, kuna generaatori pöördemoment peab vastama turbiini pöördemomendile. [13]



Joonis 4.1. Käikudeta otsetoimelise tuulegeneraatori ehitus [18]

Keskmise kiirusega generaator on harilikult ehitatud kui integreeritud lahendus, kus ülekandesuhe on vahemikus 1:10...1:20, seega generaatori kiirus on vahemikus 100...300 p/min. Sellise seadme ehitus on näha joonisel 4.2. Kasutades PM tehnoloogiat, võib leida kompaktse ja vastupidava lahenduse. Masina ehitus on veidi erinev võrreldes suure kiirusega generaatoriga, kuna pooluspaaride arv masinas on märgatavalt suurem ja seetõttu on ka lekke induktiivsus ühiku kohta suurem. Ka demagnetiseerumise risk on märgatavalt väiksem võrreldes suure kiirusega masinatega, isegi kui kasutatakse rootori pinnale paigaldatud magneteid (väljapoolusega masinad). Pidades silmas elektrimasina disaini, on keskmise kiirusega lähenemine mõistlik lahendus. Hoolimata võrdlemisi madalast kiirusest, saab masina efektiivsust optimeerida. Sarnaselt suure kiirusega generaatorile saab balansseerida rauas- ja vaseskadusid. [13]



Joonis 4.2. Reduktoriga tuulegeneraatori ehitus [18]

Suure kiirusega generaatorid on praegu eksisteerivates tuuliku süsteemidest populaarseimad. Selles lähenemises kasutatakse ülekannet suhtes 1:100, et suurendada süsteemi hinnangulist kiirust kuni traditsioonilise elektrimasina kiiruseni vahemikus 1000 ja 2000 p/min. [13]

Püsimagnetgeneraatorid võib jagada ka radiaalvooga ja aksiaalvooga masinateks, olenevalt energiavoo suunast õhupilus. On olemas ka põikvooga masinaid, kuid viimased pole suutnud tuulejõugeneraatorite vallas kanda kinnitada.

Radiaalse magnetvooga generaatorites läbib magnetvoog õhupilu radiaalses suunas nagu klassikalistes elektrimasinate lahendustes. Traditsiooniliselt on need konstrueeritud sisemise rootori ja välise staatoriga, harvem ka vastupidi. [9]

Püsimagnetid radiaalvooga masinates on radiaalselt orienteeritud. Kui kasutada radiaalse magnetvooga PM masinaid otseülekanedega tuuleturbiinides, võib tuulegeneraatori süsteem töötada hea jõudlusega erinevatel kiirustel. Tööstuses on lihtsaim viis paljupooluselise masina konstrueerimiseks PM rootori pinnale liimimine. [17]

Aksiaalse magnetvooga generaatorites läbib magnetvoog õhupilu võlliga samas sihis. Generaatori rootor paikneb aksiaalselt staatori vastas, st staatori kõrval telgjoonelises suunas. Harilikult kasutatakse ühepoolset rootorit ja staatorit, harvem kahepoolset staatorit või mitut rootorit. [9]

Aksiaalse magnetvooga PM masinate eelised võrreldes radiaal-vooga masinatega on järgnevad: lihtsad mähised, madal väändemoment ja vähene müra (uurdevabal masinal), lühike teljepikkus, kõrgem pöördemomendi-ruumala suhe. Siiski on ka puudusi: madalam väändemomendi-massi suhe, suurem välisdiameeter, suur kogus püsिमagnetiteid ja struktuuriline ebastabiilsus (uurdevabal masinal), suure diameetriga on keeruline säilitada õhupilu (uuretega masinal), staatori südämike tootmine on keeruline (uuretega masinal). [17]

### **4.3 Püsिमagnetite kasutamine tuulegeneraatorites**

1996. aastal leiti, et PM generaatorid on atraktiivsemad kui elektromagnetitega sünkroongeneraatorid. Sellest ajast saati on püsिमagnetgeneraator muutunud ahvatlevamaks tänu PM hindade langusele ja muundurite arengule. PM eelisteks elektromagnetite ees on väiksemad kaod, madalam kaal ning hind.

Haruldastest muldmetallidest püsिमagnetmaterjalid on teinud võimalikuks suurte PM masinate kasutamise. Neodüüm-raud-boor magneti põhiomadused edestavad kergelt samaarium-koobalt magnetit, kuid piiratud temperatuuristabiilsus on saanud seni suureks takistuseks selle materjali kasutamisel suure võimsusega seadeldistes. Seetõttu kasutatakse SmCo magnetiteid just sellistes kohtades, kus on vajalik masina töötamine kõrgel temperatuuril. Neodüüm-raud-boori sortide arendamine koos edendatud temperatuuri- ja korrosiooniresistentsusega on võimaldanud tõhusalt kasutada PM masinaid suurtes seadmetes, näiteks tuulegeneraatorites. [13]

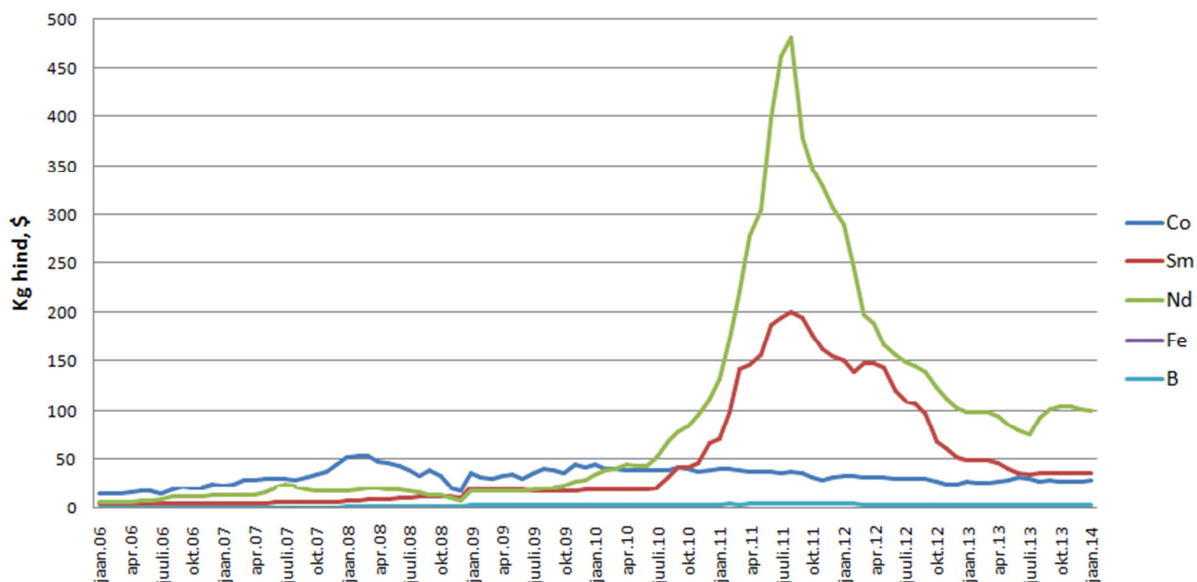
Püsिमagnetmasinad on asendanud paljusid teisi elektrimasinatüüpe erinevates valdkondades. PM materjalide eelisteks on usaldusväärsus, energiatihedus, korrosiooniresistentsus ja demagnetiseerimismõju. Uued PM materjalid on ka vähem tundlikud temperatuurimuutuste suhtes. Viimastel aastatel pakub suure efektiivsuse, usaldusväärse ja väheneva maksumusega kaasaegne jõuelektroonika võimalust muuta väljundpinget ja generaatorisagedust, et vastata süsteemi vajadustele. [19]

## 5. TEOREETILINE TAUST SmCo JA NdFeB MAGNETITEST

### 5.1 Magnetite hind ja turg

Erinevate püsomagnetitega generaatorite võrdlemisel peab arvesse võtma ka magnetite hinda. Projekteerimisel arvestatakse materjali kulu ja hinna suhet. NdFeB ja SmCo magneti hinnad ei tohiks väga palju erineda, muidu ei ole otstarbekas kallimat kasutada.

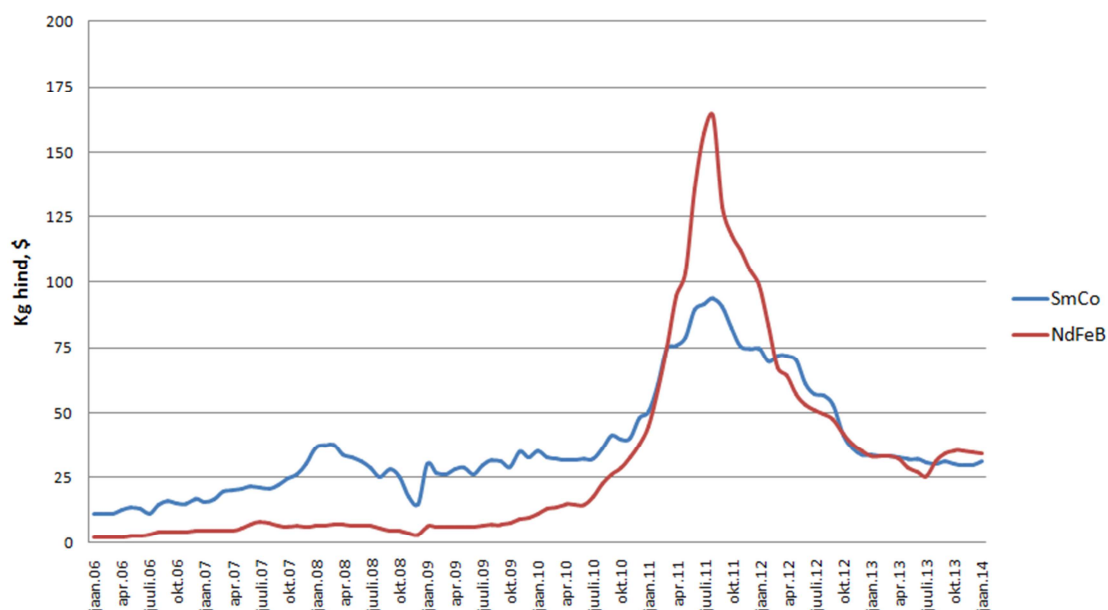
Aastate jooksul on magnetite hinnad kõikunud väga palju. Joonisel 5.1 on välja toodud mõlema püsimagneti toorainete hinnad kaheksa aasta lõikes. [20] Tänapäeval toodab Hiina ligi 80% muldmetallmagnetitest, Jaapan umbes 17% ja 3% toodetakse Euroopas.



Joonis 5.1. Magnetite toorainete hinnad 1kg kohta

Magneti valmistamiseks kuluva materjali hind on toodud joonisel 5.2, võttes arvesse, et NdFeB püsimagnet koosneb 34% neodüümist, 65% rauast ning 1% boorist ja SmCo püsimagnet koosneb 35% samaariumist ja 65% koobaltist. [20]

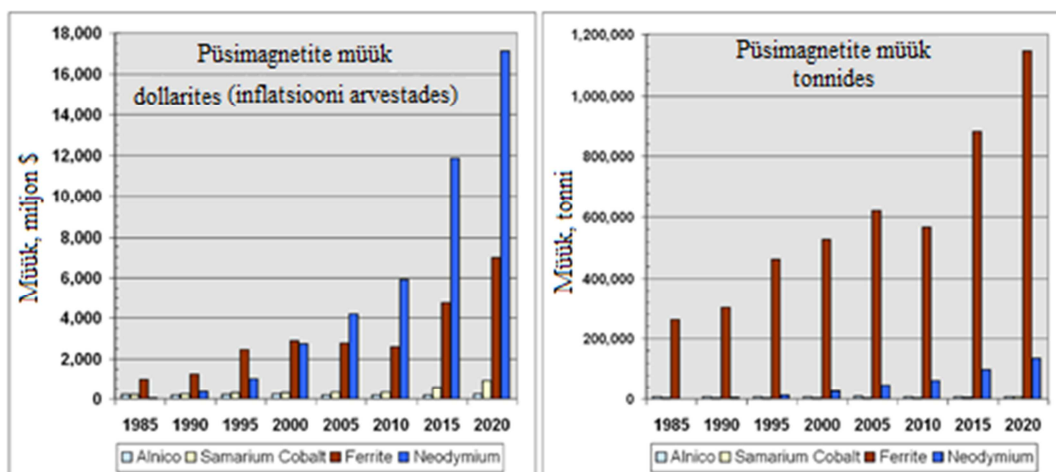




Joonis 5.2. Magnetite hind 1kg kohta aastate lõikes (lähtudes ainult tooraine hinnast)

Joonistelt 5.1 ja 5.2 on näha, et kuni 2011. aasta suveni kasvasid mõlema magneti hinnad suure kiirusega, ent suveks oli NdFeB peaaegu kaks korda kallim kui SmCo. Samal aastal rajati Aasiasse mitmeid kaevandusi ja seejärel hakkasid Nd ja Sm muldmetallide hinnad langema. Praeguseks on hinnad stabiliseerunud.

Magnetite hinnad küll langevad, aga nõudlus nende järele kasvab. Joonisel 5.3 on näha, et nelja peamise magneti müük on viimase kolme aastakümnega tunduvalt kasvanud ning kasvab samamoodi edasi. Müügitprognoosid aastateks 2015 ja 2020 sisaldavad inflatsiooniprognosi 5% aastas. Kogu see info põhineb 2010. aasta toorainete hindadel ja eeldab, et elektriautode ja tuulegeneraatorite kasutus ja areng jätkub. [21]



Joonis 5.3. Nelja peamise püsimagneeti müük dollarites (vasakul) ja tonnides (paremal)

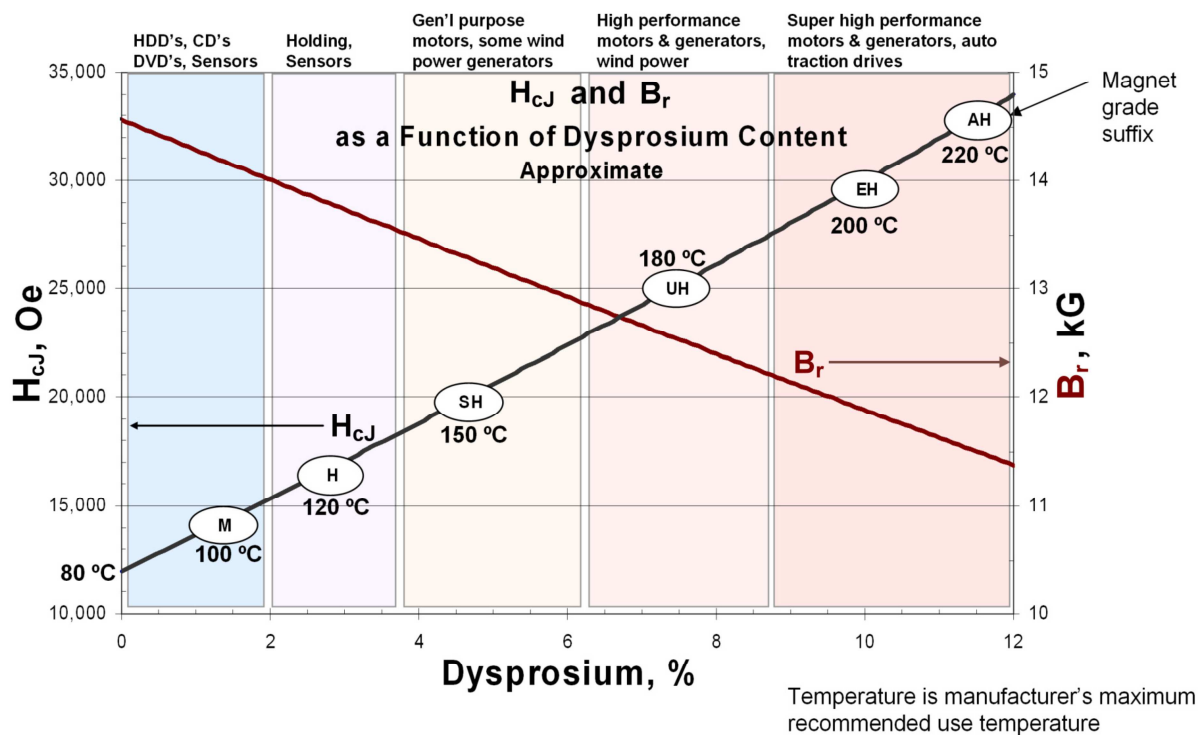
## 5.2 Neodüüm-raud-boor

Selle materjali töötas välja General Motors Inc. (GM) Ameerika Ühendriikides ja Sumitomo Special Metals (SSM) Jaapanis 1983. aastal. Nad kasutasid erinevaid protsesse, et toota sama materjali. GM tootis materjali kuumpressimise meetodil ja SSM kasutas pulbermetallurgilist meetodit.[12]

NdFeB on väga tundlik korrosioonile ja vajab lisaprotseduure tootmises, et kaitsta materjali õhuga saastumise eest. Et aeglustada korrosiooni, kaetakse materjali pind kaitsekihiga. [12]

NdFeB maksimaalne kasutamistemperatuur sõltub düsproosiumi kogusest magnetis. Kui sulamisse on lisatud ligi 11% düsproosiumi, siis võib magneti maksimaalne kasutustemperatuur olla kuni 220°C. Sellisest temperatuurist kõrgemal kaotab ta oma magnetilised omadused – seda temperatuuri nimetatakse Curie-temperatuuriks. [21]

Rasked muldmetallid nagu terbium ja düsproosium on kasulikud, et tõsta neodüümmagnetite sisemist koertsitiivsust ehk vastupidavust demagnetiseerimisele. Terbium on tõhusam kui düsproosium, kuigi ka haruldasem, seetõttu kasutatakse peamiselt düsproosiumi neodüümmagnetite termiliste omaduste tõstmiseks. Joonisel 5.4 on näidatud, kui palju tõuseb magneti maksimaalne kasutustemperatuur sõltuvalt düsproosiumi sisaldusest ning selle mõju jääkmagnetvoo tihedusele  $B_r$  ja koertsitiivjõule  $H_c$ . [21]



Joonis 5.4. Düsproosiumi kasutamine neodüümmagnetites, selle mõju jääkmagnetvootihedusele ja koertsitiivjõule ning tüüpilised kasutusvaldkonnad

### 5.2.1 NdFeB magnetmaterjali eelised ja puudused

Neodüümmagneti eelised kaaluvad üles tema puudused ning teda kasutatakse laialdaselt püsिमagnetmasinates. [12]

Eelised:

- Kõrge energiatihedusega materjal
- Palju erinevaid viise materjali tootmiseks (paagutamine, valamine, sepistamine)
- Sirgjooneline demagnetiseerimiskõver
- Palju omadustekombinatsioone (temperatuuritaluvus, jääkmagnetvootihedus ja koertsitiivjõud)

Puudused:

- Madal maksimaalne kasutustemperatuur tänu madalale Curie-temperatuurile
- Korrosioonitundlik, vajades erilisi katteid ja käsitlemist
- Pulbri kujul oksüdeerub hetkeliselt õhuga kokkupuutel (pürofoorsus)
- Töötlemine on keerukas
- Täielikuks magnetiseerimiseks on vaja väga tugevat magnetvälja

- Käsitlemine on keerukas tema tugeva magnetvälja tõttu
- Mitmeastmeline tootmisprotsess nõuab suurt kapitali investeerimist ja seda on keeruline kontrollida ja automatiseerida

### 5.3 Samaarium-koobalt

Enne NdFeB avastamist oli SmCo sulam kõige kõrgema energiatihedusega püsomagnet. Selle materjali väljatöötamine jäi ajavahemikku 1969-1974. SmCo püsimateid toodetakse pulbermetallurgia protsessi kasutades. Muldmetall-koobalt sulamitel on kõrgem Curie-temperatuur kui NdFeB sulamitel, andes neile kõrgema maksimaalse kasutustemperatuuri. See temperatuur on tavaliselt 350 °C, aga on ka tehtud selliseid sulameid, mis kannatavad enam kui 500 °C. Nii kõrge temperatuur saavutatakse, kui sulamis suurendatakse koobalti sisaldust ning vähendatakse raua oma. Kõrgetel temperatuuridel võivad mõned omadused olla paremad kui NdFeB sulamitel ja sellepärast kasutatakse neid magnetiteid karmimates temperatuurides. SmCo sulamid on korrosioonile vastupidavamad kui NdFeB sulamid. [12], [21]

#### 5.3.1 SmCo magnetmaterjali eelised ja puudused

SmCo magnetmaterjalil on omad eelised teiste magnetite ees, samas ka mitmeid puuduseid. [12]

Eelised:

- Suure energiatihedusega sulamid, kuigi mitte nii head kui parimad NdFeB sulamid toatemperatuuril
- Töötemperatuur on kõrgem kui NdFeB püsimateil (max temperatuur ~350°C)
- Korrosioonikindlus on parem kui NdFeB püsimateil
- Sirgjooneline demagnetiseerimiskõvernagu NdFeB-l

Puudused:

- Pulbri kujul oksüdeerub hetkeliselt õhuga kokkupuutel (pürofoorsus)
- Töötlamine on keerukas
- Käsitlemine on keerukas tema tugeva magnetvälja tõttu.
- Kasutab kalleid strateegilisi toormaterjale

## 6. GENERAATOR

Eelolevas peatükis tuleb juttu katseseadmest, millega katsetati nii NdFeB kui ka SmCo püsिमagnetitega generaatori rootorit. Tuuakse välja kasutatavate püsिमagnetite tüübid ja nende suuruste erinevused.

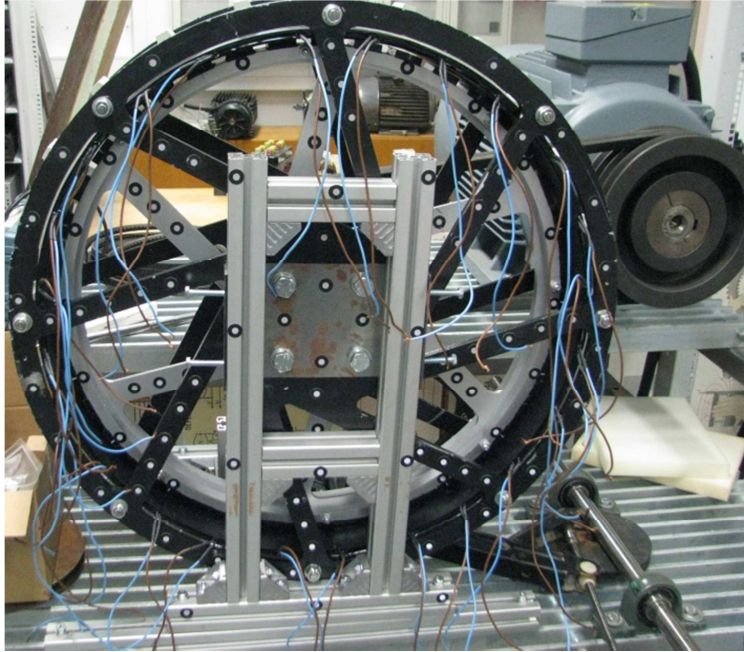
Peatükis esitatakse magnetvälja arvutused analüütilisel ning lõplike elementide meetodil. Mõlema viisiga on tehtud lihtsustus ja eeldatakse, et masin on lineaarne, kuna seadme raadius on märgatavalt suurem kui pooluse pikkus.

Pärast magnetvootiheduse leidmist saab arvutada mähises indutseeritud elektromotoorjõu, et näha, kuidas käitub generaator tühijooksukatsel. Koormuskatsetuste tulemuste graafikute saamiseks on vaja leida faasipinge ja -vool. Arvutuste tulemused on näidatud graafikutes, kus on näha mõlema rootoriga tekkivaid erinevusi ja muutusi.

### 6.1 Katseseade ja katsetuste kirjeldus

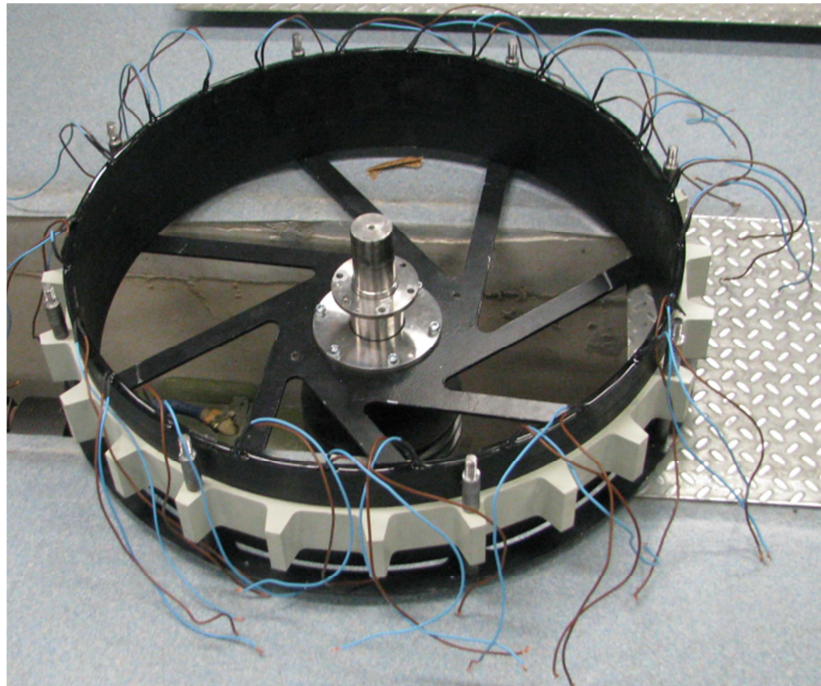
Katsetused viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli elektrimasinate laboris. Katseseadmeks oli uurdevaba sünkroongeneraator, millele oli ehitatud NdFeB ja SmCo püsिमagnetitega rootorid. Need olid suhteliselt kiiresti eemaldatavad ja vahetatavad. Generaator oli kinnitatud rakisega laua külge, kuhu oli kinnitatud ka tuult simuleeriv elektrimootor. Katseseadet koos mootoriga on näha joonisel 6.1. Generaatori projekteerimisest on kirjutatud doktoritöö [9].

Generaatorit vedas ringi 30 kW elektrimootor, mis oli rootoriga ühenduses rihmülekanega. Selle elektrimootori kiirust reguleeris sagedusmuundur VF-PS1, millega sai katsetada seadet erinevatel pöörlemiskiirustel. Pärast iga kiiruse muutmist sai mõõta generaatori rootorilt masina pööremiskiirust optilise tahhomeetriga.

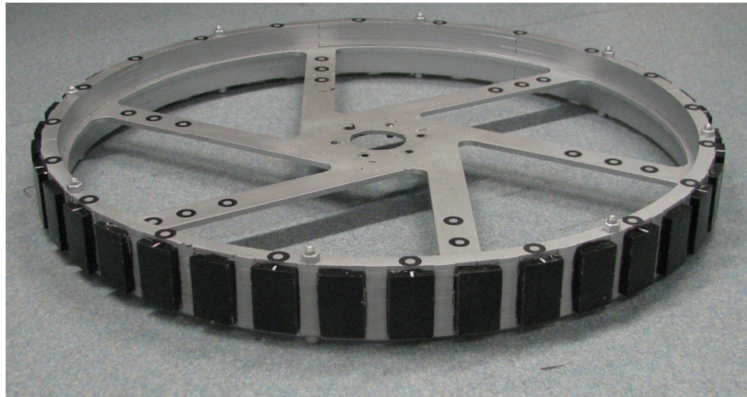


Joonis 6.1. Katseseade koos elektrimootoriga

Joonisel 6.2 on näha katseseadme staator lahtivõetuna, kui vahetati roorit. Joonisel on näha staatori ike koos jahutuseks mõeldud ribidega, kompaundi valatud mähis, kus kõikide mähisepoolide otsad on välja toodud. Joonisel 6.3 on NdFeB püsिमagnetitega rootor enne masinasse paigutamist.



Joonis 6.2. Püsिमagnetgeneraatori staator



Joonis 6.3. NdFeB püsomagnetitega rootor

Generaatori mõlema rootoriga sooritati kaks eri katsetust. Üks oli tühijooksukatsetus ja teine koormuskatsetus. Esimene sooritati erinevatel pöörlemiskiirustel alustades 30 p/min ja lõpetades 250 p/min. Koormuskatsetus sooritati nimipöörlemiskiirusel 230 p/min, koormates kõiki kolme faasi võrdsete aktiivkoormustega. Seisva seadmega mõõdeti magnetvoo tihedust õhupilus ühe pooluspaari pikkuselt. Tabelis 6.1 on esitatud katsegeneraatori nimiaandmed ja tähtsamad parameetrid.

Tabel 6.1. Katseseadme nimiparameetrid

Parameeter	Väärtus
Nimivõimsus	5 kW
Nimipöörlemiskiirus	230 p/min
Nimipinge	270 V <sub>ac</sub>
Nimivool	11,2 A <sub>ac</sub>
Mähiste arv	24
Pooluste arv	40
Generaatori diameeter	690 mm
Õhupilu laius	2,5 mm
Võimsustegur	0,96

## 6.2 Püsिमagnetid

Genraatori rootorit projekteerides valiti magnetiteks NdFeB tüüp N42 ja SmCo tüüp 28 püsिमagnetid [9]. Kuna SmCo magnetitel on madalam energiatihedus kui NdFeB magnetitel, siis nende ruumala peab olema suurem, et saavutada sama suurt energiatihedust generaatori õhupilus kui NdFeB püsिमagnetitega.



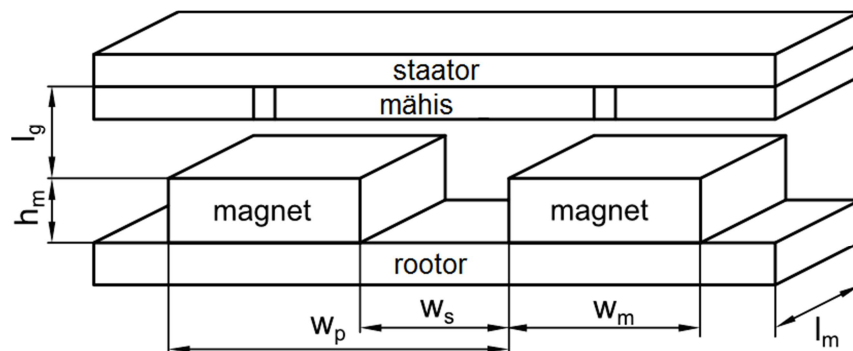
Isegi kui maksimaalne energiatihedus NdFeB magneti puhul on 55% suurem kui SmCo magnetil, siis leiti, et SmCo magneti ruumala peab olema 110% suurem kui NdFeB magnetiga. Et sellist ruumala vahet saavutada, pidi SmCo magneti kõrgus olema 1,5 kordne ja laius 1,4 kordne võrreldes NdFeB magnetiga.

Majanduslikust seisukohast tähendab see seda, et SmCo magnetitega rootor on raskem ning on vaja suuremat kogust magneteid.

## 6.3 Arvutused

### 6.3.1 Magnetvoo arvutused

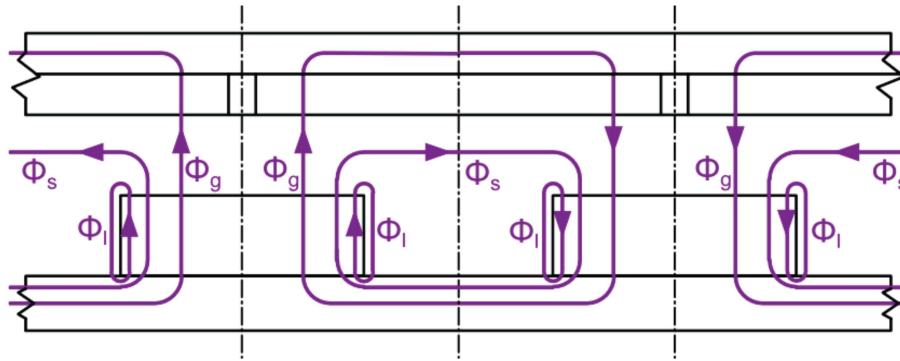
Generaatori väljundparameetrite arvutamiseks on vaja teada magnetvootihedust õhupilus ja mähise indutseeritud elektromotoorjõudu. Et arvutada magnetvootihedus, kasutati magnetvälja ahelate teooriat. Selleks on vaja teada magnetite, mähiste, staatori ja rootori parameetreid. Need mõõtmed on teada ja asetus on näidatud joonisel 6.4.



Joonis 6.4. Magnetite ja mähiste asetuse skeem [3]

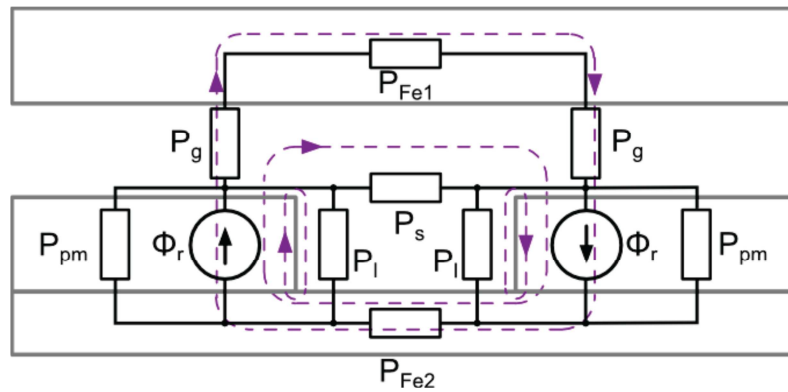
Magnetvoogu saab kirjeldada nelja komponendi abil: magnetvoog õhupilus  $\Phi_g$ , lekkevoog magneti külgedel  $\Phi_l$ , lekkevoog naaberpoolusele  $\Phi_s$  ja jääkvoog  $\Phi_r$ , mis on võrdne ülejäänud kolme magnetvoo summaga. Nende magnetvoogude jaotust on kujutatud joonisel 6.5.





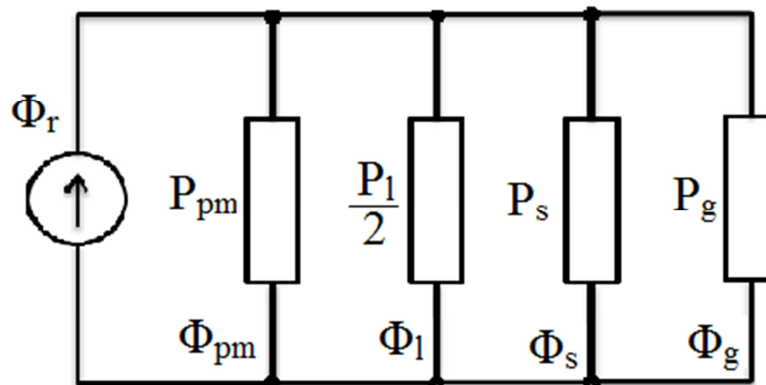
Joonis 6.5. Magnetvood generaatoris [3]

Joonisele 6.5 võrdväärne magnetiline skeem on kujutatud joonisel 6.6.



Joonis 6.6. Skeem magnetvoo tiheduse arvutamiseks õhupilus [3]

Lähtudes joonistest 6.5 ja 6.6 võib teha lihtsustatud magnetilise skeemi, mis on kujutatud joonisel 6.7. Jooniselt on näha, et magnetiline skeem koosneb neljast läbitungivuse alast – magneti läbitungivus  $P_{pm}$ , lekkevoog magneti külgedel  $P_l$ , läbitungivus õhupilus olevale lekkevoolule  $P_s$  ja õhupilu läbitungivus  $P_g$ . Et leida magnetvoog õhupilus, tuleb kõigepealt need neli parameetrit välja arvutada.



Joonis 6.7. Võrdväärne lihtsustatud skeem magnetvoo tiheduse arvutamiseks [9]

Et arvutada indutseeritud elektromotoorjõud ja magnetvootihedus õhupilus tuleb enne arvutada magneti läbitungivus  $P_{pm}$ , mida saab leida valemiga:

$$P_{pm} = \mu_0 \mu_r \frac{A_{pm}}{h_m} = \mu_0 \mu_r \frac{l_m w_m}{h_m} \quad (6.1)$$

kus  $\mu_0$ – vaakumi magnetiline läbitavus =  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m,  
 $\mu_r$ – magnetiline läbitavus,  
 $A_{pm}$ – magneti pinna pindala,  
 $h_m$ – magneti kõrgus,  
 $l_m$ – magneti pikkus,  
 $w_m$ – magneti laius.

Järgmiseks tuleb leida lekkevoog magneti külgedel  $P_l$ , mida saab leida valemiga:

$$P_l = \frac{\mu_0 l_m}{\pi} \int_0^{\frac{w_m}{2}} \frac{dx}{x + \frac{h_m}{\pi}} = \frac{\mu_0 l_m}{\pi} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\pi w_m}{2 h_m} \right) \quad (6.2)$$

Et leida läbitungivus õhupilus olevale lekkevoole  $P_s$ , tuleb kasutada valemit:

$$P_s = \frac{\mu_0 l_m}{\pi} \int_0^{l_g} \frac{dx}{x + \frac{w_s}{\pi}} = \frac{\mu_0 l_m}{\pi} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\pi l_g}{w_s} \right) \quad (6.3)$$

kus  $l_g$ – õhupilu paksus,  
 $w_s$ – kahe magneti vaheline laius.

Ja viimaks tuleb leida õhupilu läbitungivus  $P_g$  valemiga:

$$P_g = \mu_0 \frac{A_{pm}}{l_g} = \mu_0 \frac{l_m w_m}{l_g} \quad (6.4)$$

Nüüd kui magnetiline skeem on lahendatud siis saab arvutada magnetvootiheduse õhupilus  $\Phi_g$  mille leiame leiab valemiga:

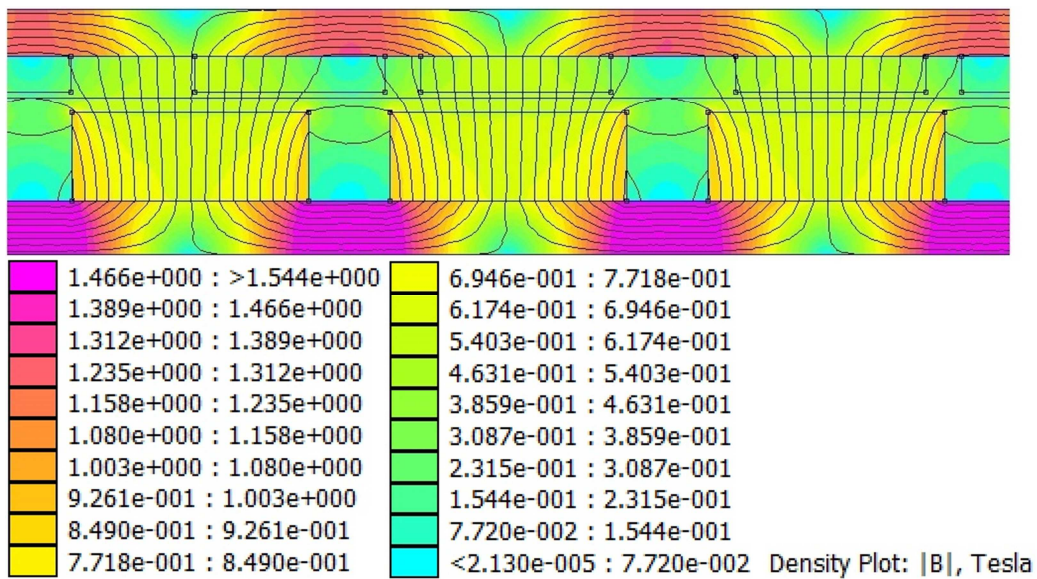
$$\phi_g = \phi_r \cdot \frac{P_g}{P_\Sigma} = \frac{B_r \cdot l_m \cdot w_m \cdot P_g}{P_{pm} \cdot P_l + \frac{P_s}{2} + P_g} \quad (6.5)$$

kus  $B_r$ – jääkmagnetvoo tihedus.

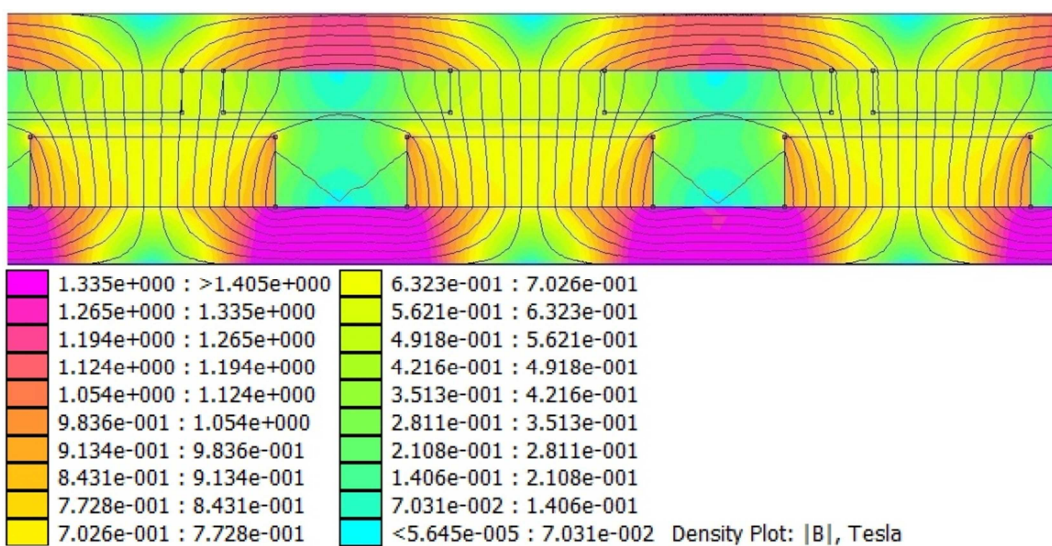
### 6.3.2 FEM analüüs

Teine viis, kuidas leida magnetvootihedus õhupilus, on kasutada lõplike elementide arvutuse meetodikat ehk FEMi. Seda arvutust võib teha käsitsi, kuid kuna selle jaoks on olemas programmid, siis siin töös on see tehtud vabavara programmiga FEMM 4.2 [10].

Programmiga on tehtud graafilised joonised (joonisel 6.8 ja 6.9), kus on kujutatud mõlema generaatori magnetvälja jõujooni ja magnetvoo tiheduse jaotust eri piirkondades. Jooniselt on ka näha, et vasest mähised ja nende ümber valatud kompaund ei mõjuta jõujooni.

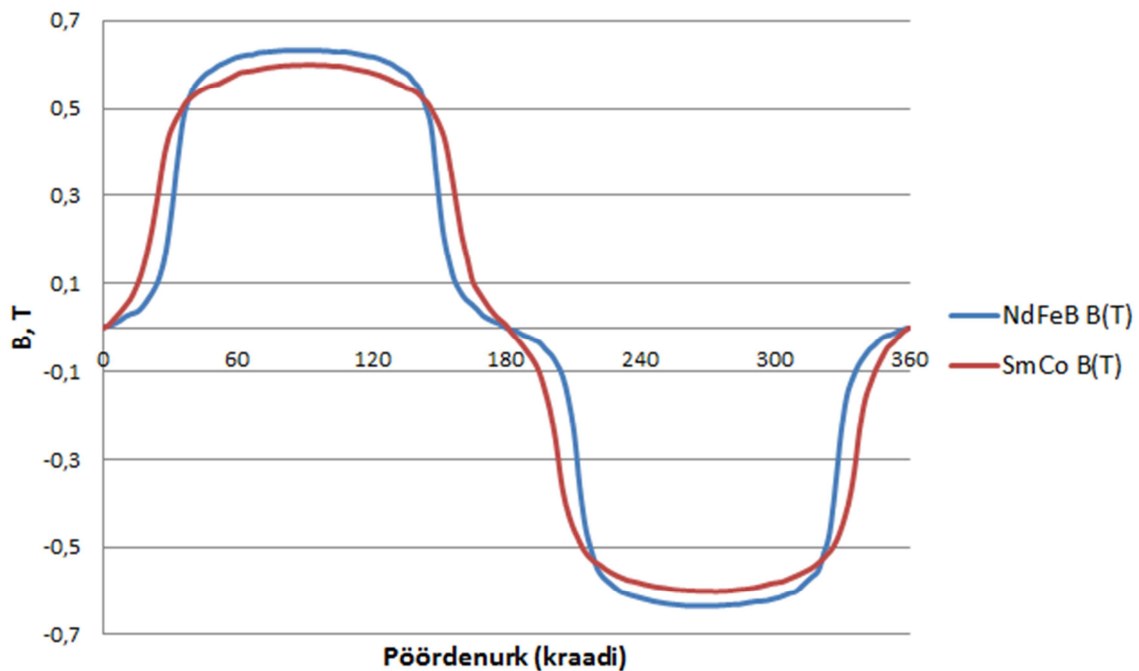


Joonis 6.8. SmCo püsिमagnetitega rootori magnetvoo tiheduse simulatsioon



Joonis 6.9. NdFeB püsिमagnetitega rootori magnetvoo tiheduse simulatsioon

Antud programmiga saab arvutada magnetvoo tihedused õhupilus. Need tulemused on lisatud graafikusse ja esitatud joonisel 6.10. Jooniselt on näha, et NdFeB magneti magnetvoog on õhupilus suurem kui SmCo magnetil. Kõrgeim väärtus NdFeB magnetiga tuli 0,633 T ja SmCo magnetiga 0,600 T. Samuti on näha, et NdFeB magnet on kitsam ja magnetite vaheline pikkus on suurem kui SmCo magnetiga rootoril. Mõlemal juhul magnetvoo väärtus muutub järsult magneti servas ja magnetite vahel ning on ühtlasem magneti kohal.



Joonis 6.10. Magnetvootiheduse jaotus õhupilus ühe pooluspaari pikkuses

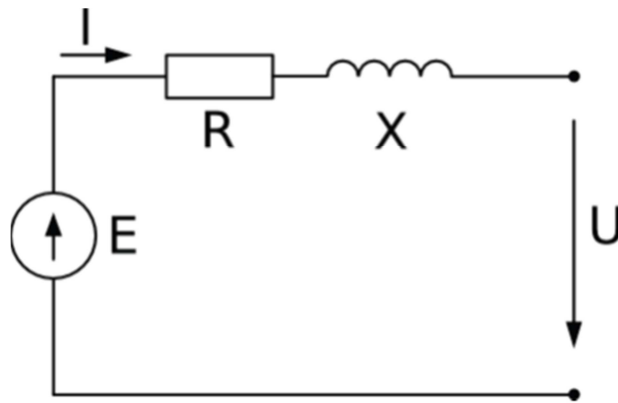
### 6.3.3 Elektriliste parameetrite arvutused

Teades magnetvootihedust õhupilus, saab nüüd arvutada ühe faasi mähises indutseeritud elektromotoorjõud sagedusel  $f$  valemiga:

$$E(f) = \frac{\sqrt{2}\pi n_c n_t k_w \phi_g}{m} f \quad (6.6)$$

kus  $n_c$  – mähiste arv,  
 $n_t$  – keerdude arv,  
 $k_w$  – mähise tegur,  
 $m$  – faaside arv.

Et arvutada faasipinget ja -voolu, saab kasutada lihtsustatud skeemi, mis on näha joonisel 6.11. Skeemilt on näha, et kõigepealt tuleb leida mähise takistus  $R$  ja reaktiivtakistus  $X$ .



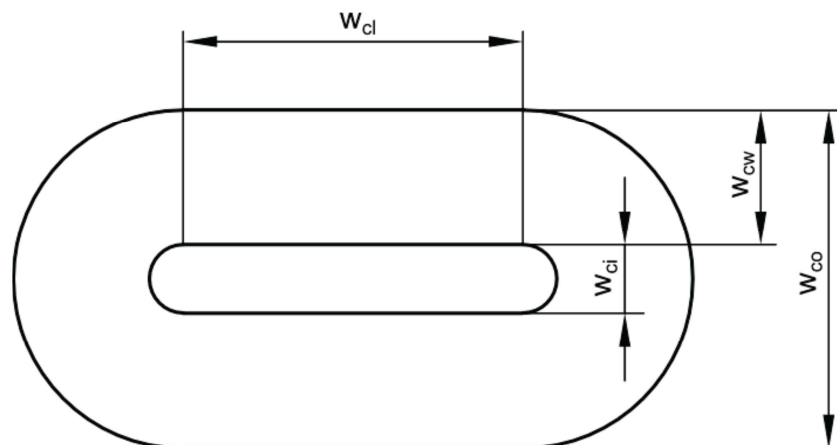
Joonis 6.11. Ühe faasi lihtsustatud skeem[3]

Mähise takistuse  $R$  saab leida valemiga:

$$R = \rho \cdot \frac{n_c \left( 2w_{cl} + \pi \frac{5}{8} w_{co} \right)}{S_t \cdot n_p} \cdot \frac{n_c}{m} \quad (6.7)$$

kus  $\rho$  – mähise materjali eritakistus,  
 $w_{cl}$  – mähise pikkus,  
 $w_{co}$  – mähise laius,  
 $S_t$  – juhtme ristlõike pindala,  
 $n_p$  – paralleelsete juhtmete arv.

Parema ülevaate staatori mähise parameetritest saab jooniselt 6.12



Joonis 6.12. Staatori mähise pealtvaade

Et leida faasi reaktiivtakistus  $X$ , tuleb enne seda leida mähise induktiivsus  $L_c$ . Siin on kasutatud lihtsustatud arvutust, kuid niigi lihtsustatud mudeli tulemust see ei mõjuta. Induktiivsuse saab arvutada valemiga:

$$L_c = \frac{40r_{eq}^2 \cdot n_t^2}{6r_{eq} + 9l_c + 10w_{cw}} \quad (6.8)$$

kus  $r_{eq}$  – mähise raadius

$l_c$  – juhtme kogupikkus

$w_{cw}$  – mähise pikkiosa laius, täpsustuse saamiseks vaadata joonist 6.12

Pärast seda saab leida faasi reaktiivtakistuse  $X$ , kindlal sagedusel  $f$ , valemiga:

$$X(f) = \frac{2\pi L_c n_c}{m n_p} f \quad (6.9)$$

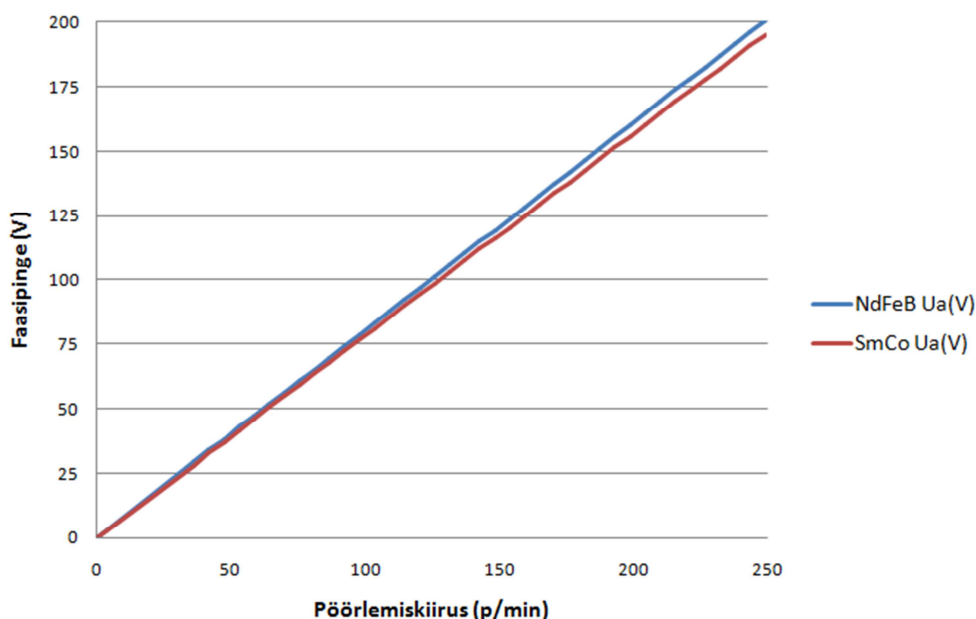
Teades nüüd mähise takistust ja reaktiivtakistust saab leida faasivoolu  $I$  kindlal võimsusel  $P$ , valemiga:

$$I(P) = \frac{P}{m \cdot U_{t-1}} \quad (6.10)$$

Viimaseks saab leida faasipinge  $U$ , mis on sõltuvuses võimsusest ja sagedusest. Faasipinge leiame valemiga:

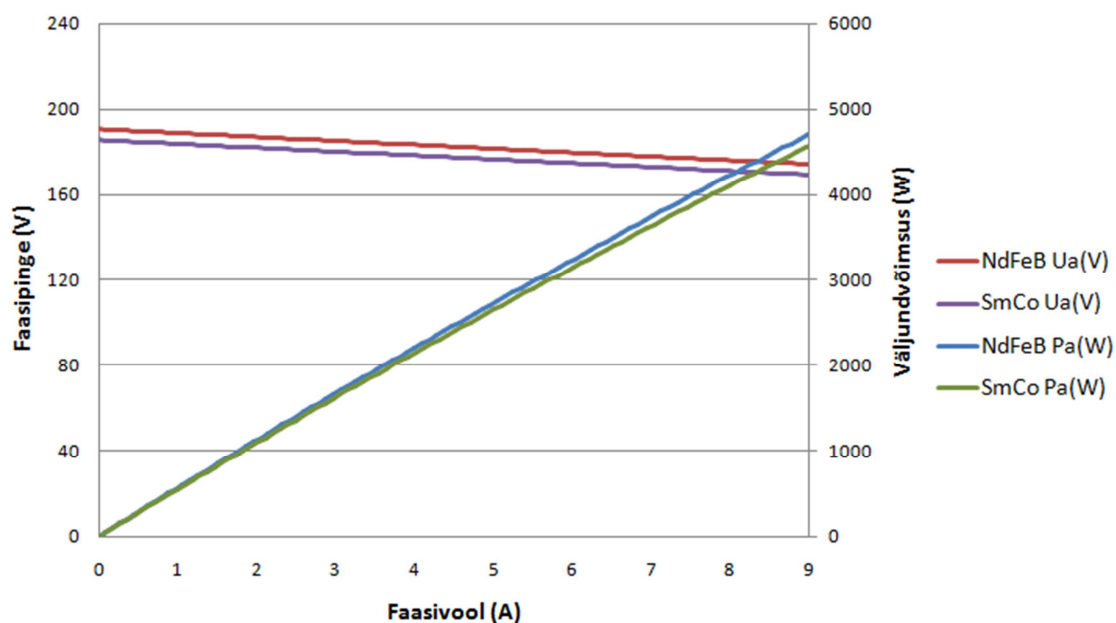
$$U(P, f) = E(f) - jX(f)I(P) - RI(P) \quad (6.11)$$

Arvutuslik tühijooksugraafik on esitatud joonisel 6.13. Selle konstrueerimiseks on vaja kasutada valemit 6.6. Jooniselt on näha, et pöölemiskiiruse kasvades suureneb pinge lineaarselt. Kui kasutada NdFeB või SmCo rootorit, on graafik peaaegu samasugune. Nimipöörlemiskiiruse juures, mis on 230 p/min, on kahel magnetil pinge erinevus 4 V. Selline erinevus oli oodatud, kuna maksimaalne magnetvootihedus õhupilus oli samuti natuke erinev.



Joonis 6.13. Arvutuslik tühi jooksugraafik

Arvutuslik koormusgraafik on esitatud joonisel 6.14. Koormusgraafiku tulemused on arvatud konstantse pöörlemiskiiruse juures, mis on 230 p/min. Tulemustelt on näha, et koormuse kasvades väljundpinge kahaneb. See tuleb sellest, et vool kasvab ja pingelang on voolu ja näivtakistuse korrutis. Kuna näivtakistus on mõlema magneti puhul sama, siis ka pingelang on mõlemil ühesugune ja graafiku jooned langevad sama kiirusega. Väljundkoormuse erinevuse suurenemine voolu kasvades tuleb sellest, et pinged on erinevad ja suurema voolu korral mõjub pingelangu-erinevus rohkem.



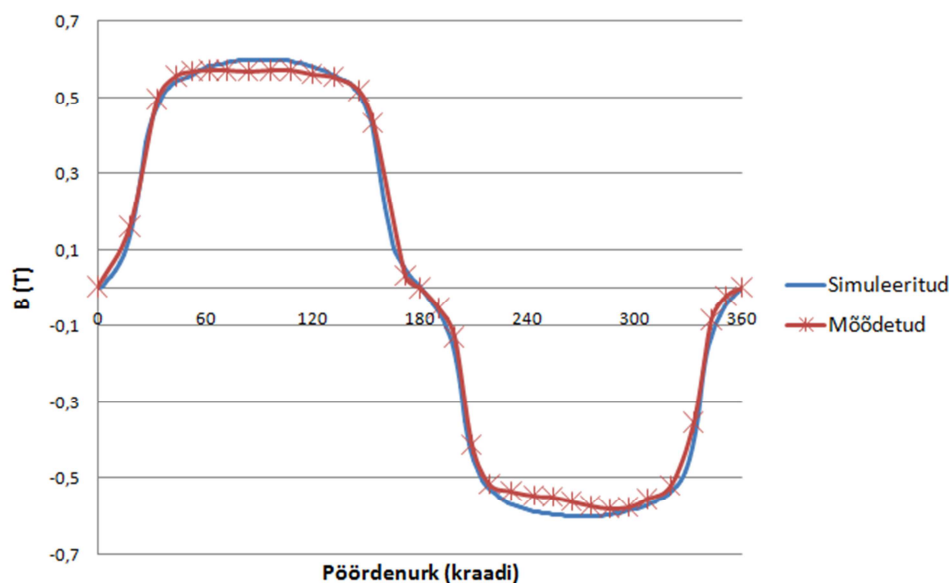
Joonis 6.14. Arvutuslik koormusgraafik

## 7. SmCo GENERAATORI KATSETUSED LABORIS

### 7.1 Magnetvoo mõõtmine õhupilus

Magnetvoo tihedust õhupilus mõõdeti seadmega Magnet-Physik FH-55. Mõõteriistal on spetsiaalne radiaalsuunalise magnetvootiheduse mõõteandur, mida saab paigutada magneti ja staarori vahelisse õhupilusse. Tähtis on jälgida, et andur oleks õigesti paigutatud – magnetvooga paralleelselt. Mõõtmised tehti seisva seadmega ja ühe pooluspaari pikkuselt.

Mõõtetulemused koos simuleeritud tulemustega on esitatud joonisel 7.1. Graafikust on näha, et mõõtetulemused ja FEM analüüsist saadud tulemused on üsna sarnased, aga maksimaalne magnetvootihedus on mõõdetust 0,029 T madalam. Kuna mõõteseade on väga tundlik, siis erinevused võivad tulla juba pisemastki mõõteanduri paigutamise veast.

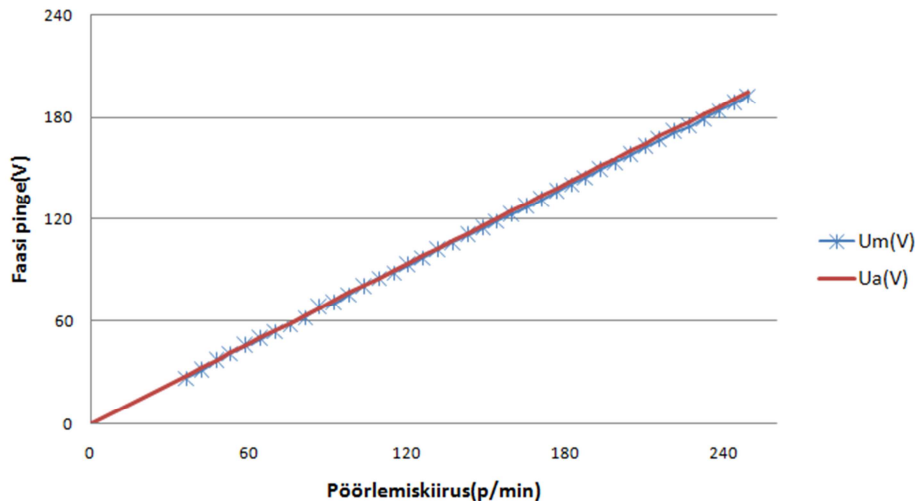


Joonis 7.1. Magnetvootihedus õhupilus kasutades SmCo püsिमagnetitega rootorit

### 7.2 Tühijooksukatsetus

Tühijooksukatsetuse mõõtetulemused on esitatud joonisel 7.2 koos arvutatud tulemustega. Jooniselt on näha, et mõõtetulemused on suurema kiiruse juures natukene madalamad kui arvutatult. Mõõtetulemused algavad 30 p/min ja lõppevad 250 p/min juures. Kõrgeima kiiruse juures on pinge erinevus ainult 2 V. Mõlemad tulemused kasvavad pöörlemiskiiruse suurenedes lineaarselt. Võib öelda, et mõõtetulemused on peaaegu võrdsed arvutatud tulemustega.

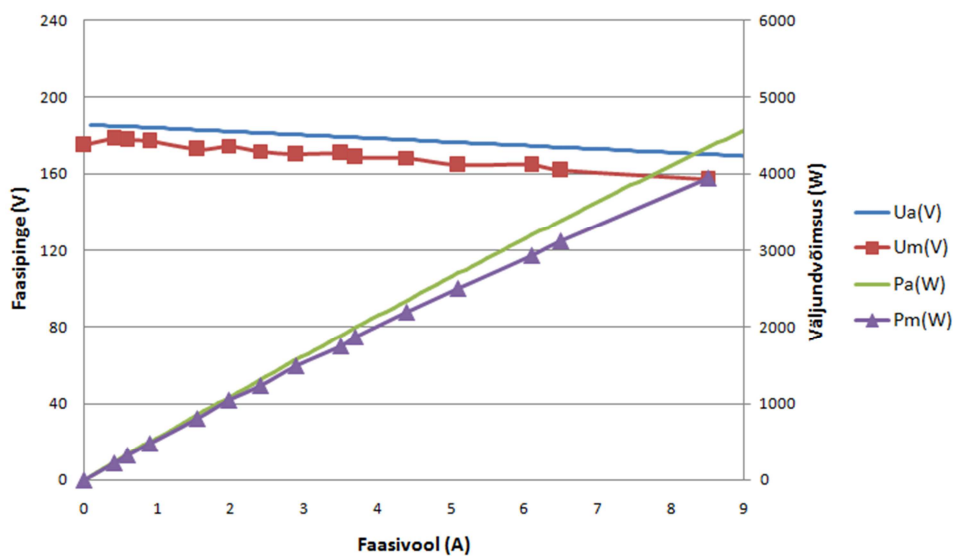




Joonis 7.2. SmCo generaatori tühijooksu katse mõõtetulemused koos arvatud tulemustega ("m" tähistab mõõdetud tulemusi ja "a" tähistab arvatud tulemusi)

### 7.3 Koormuskatsetus

Koormuskatsetuse mõõtetulemused koos arvatud tulemustega on esitatud joonisel 7.3. Mõõtetulemuste kõikumine tuleneb sellest, et sagedusmuunduril on samm liiga suur ning sellest tuli sisse väike kiiruse kõikumine. Jooniselt on näha, et faasipinge kahaneb koormuse suurenedes ja see on põhjustatud mähise takistusest ja mahtuvusest. Mõõdetud ja arvatud tulemuste erinevuse kasvamine suuremal koormusel tuleneb mähise soojenemisest tekkinud lisakadudest. Kuna katseseadmel ei olnud loomulikku ega sundjahutust, siis mähiste ülekuumenemise vältimiseks lõpetasime koormuskatsetuse 4 kW väljundvõimsuse juures.

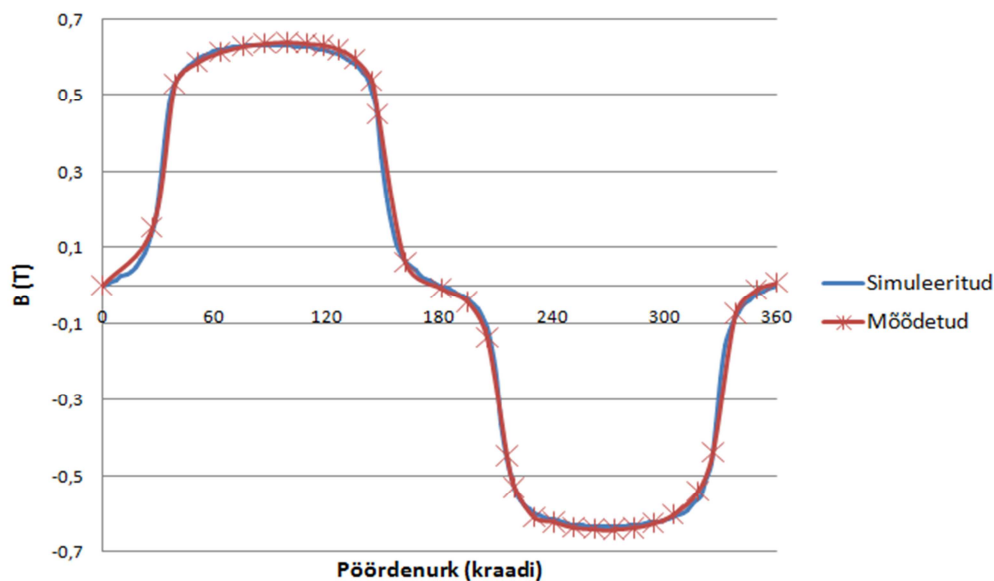


Joonis 7.3. SmCo generaatori koormuskatse mõõtetulemused koos arvatud tulemustega konstantsel pöörlemiskiirusel 230p/min

## 8. NdFeB GENERAATORI KATSETUSED LABORIS

### 8.1 Magnetvoo mõõtmine õhupilus

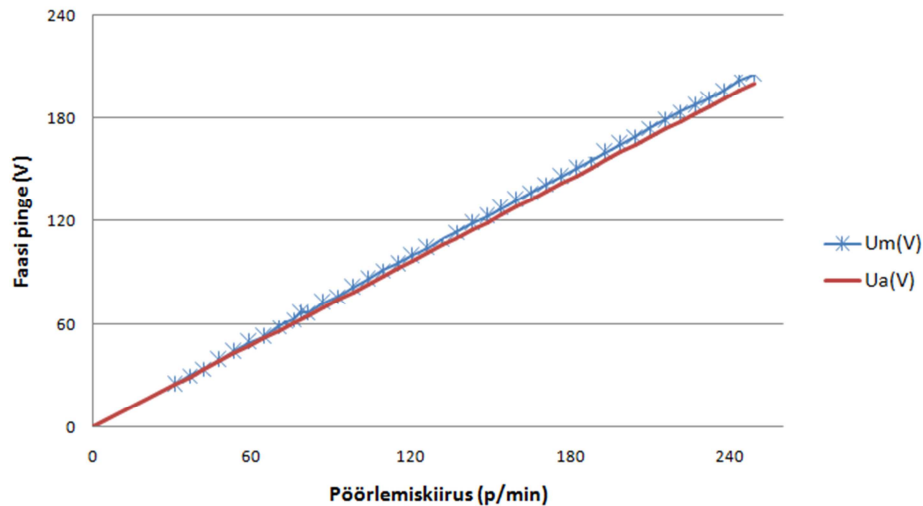
NdFeB PM rooriga generaatori magnetvootiheduse mõõtetulemused koos simuleeritud tulemustega on esitatud joonisel 8.1. Graafikust on näha, et mõõtetulemused ja FEM analüüsist saadud tulemused on väga analoogsed. Maksimaalse väärtuse erinevus tuli ainult 0,006 T ning mõõdetud väärtus oli suurem kui arvutatud. Et joonised oleksid veel ühtlasemad ja kattuvad, pidanuks tegema mõõtmisi veel tihedama sammuga, eriti magnetite vahelisel alal.



Joonis 8.1. Magnetvootihedus õhupilus, kasutades NdFeB püsिमagnetitega roorit

### 8.2 Tühijooksukatsetus

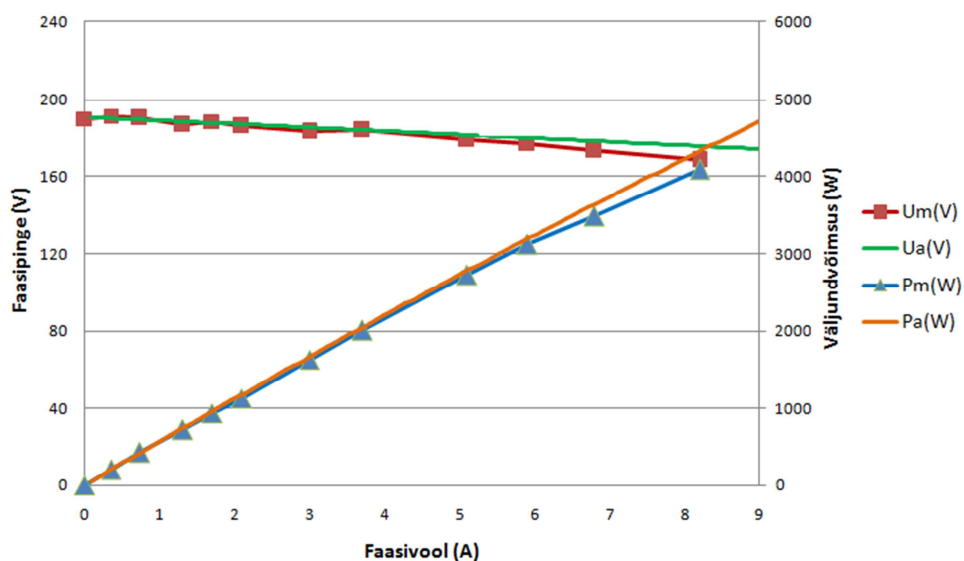
Tühijooksukatsetuse mõõtetulemused on esitatud joonisel 8.2 koos arvutatud tulemustega. Jooniselt on näha, et mõõtetulemused on suurema kiiruse juures natuke kõrgemad kui arvutatult. Mõõtetulemused algavad 30 p/min ja lõppevad 250 p/min juures ning viimase mõõtmise juures on arvutatud ja mõõdetud tulemuse erinevus 5 V. Erinevus võib tulla sellest, et mõõdetud magnetvootihedus oli samuti suurem kui arvutatult.



Joonis 8.2. NdFeB generaatori tühijooksu katse mõõtetulemused koos arvatud tulemustega

### 8.3 Koormuskatsetus

Koormuskatsetuse mõõtetulemused koos arvatud tulemustega on esitatud joonisel 8.3. Mõõtetulemuste kõikumine tuleneb sellest, et sagedusmuunduril samm on liiga suur ja sisse tuli väike kiiruse kõikumine. Jooniselt on näha, et faasipinge kahaneb koormuse suurenedes ja see on põhjustatud mähise takistusest ja mahtuvusest. Samuti on näha, et suuremal koormusel mõõdetud väljundpinge hakkab erinema arvatud väärtustega. See tuleneb soojenemisel tekkivatest lisakadudest. Kuna katseseadmeh ei olnud loomulikku ega sundjahutust, siis mähiste ülekuumenemise vältimiseks lõpetasime koormuskatsetuse 4 kW väljundvõimsuse juures.

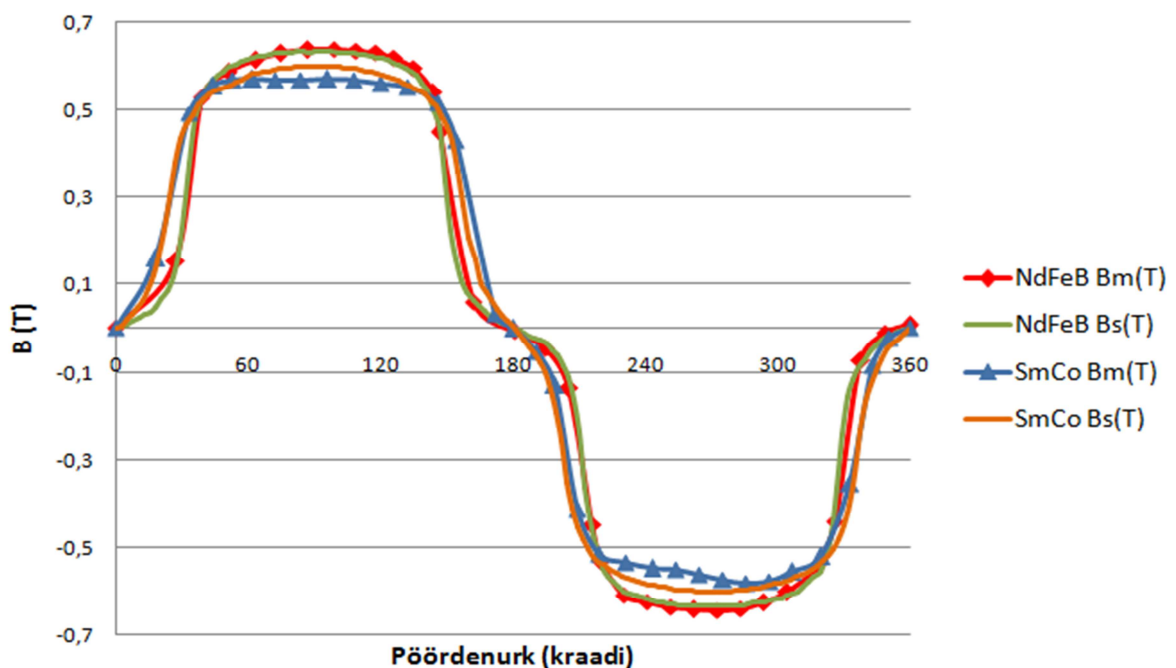


Joonis 8.3. NdFeB generaatori koormuskatse mõõtetulemused koos arvatud tulemustega konstantsel pöörlemiskiirusel 230p/min

## 9. KAHE MASINA OMAVAHELINE VÖRDLUS

### 9.1 Magnetvootihedus õhupilus

Joonisel 9.1 on näha mõlema rootoriga mõõdetud ja simuleeritud magnetvootiheduse tulemusi ühes graafikus. Maksimaalsete väärtuste erinevus on mõõdetult 0,06 T ja arvutatult 0,03 T. Jooniselt on näha, et NdFeB püsिमagnetiteid kasutades on magnetvootihedus nii arvutatud kui mõõdetul juhul suurem kui SmCo magnetiteid kasutades. Erinevusi mõõdetud ja simuleeritud tulemuste vahel võib põhjendada FEM analüüsi lihtsustustega ning mõõtmiste ebatäpsusega. SmCo magnetitega on maksimaalne mõõdetud väärtus 10% madalam kui NdFeB magnetitega.



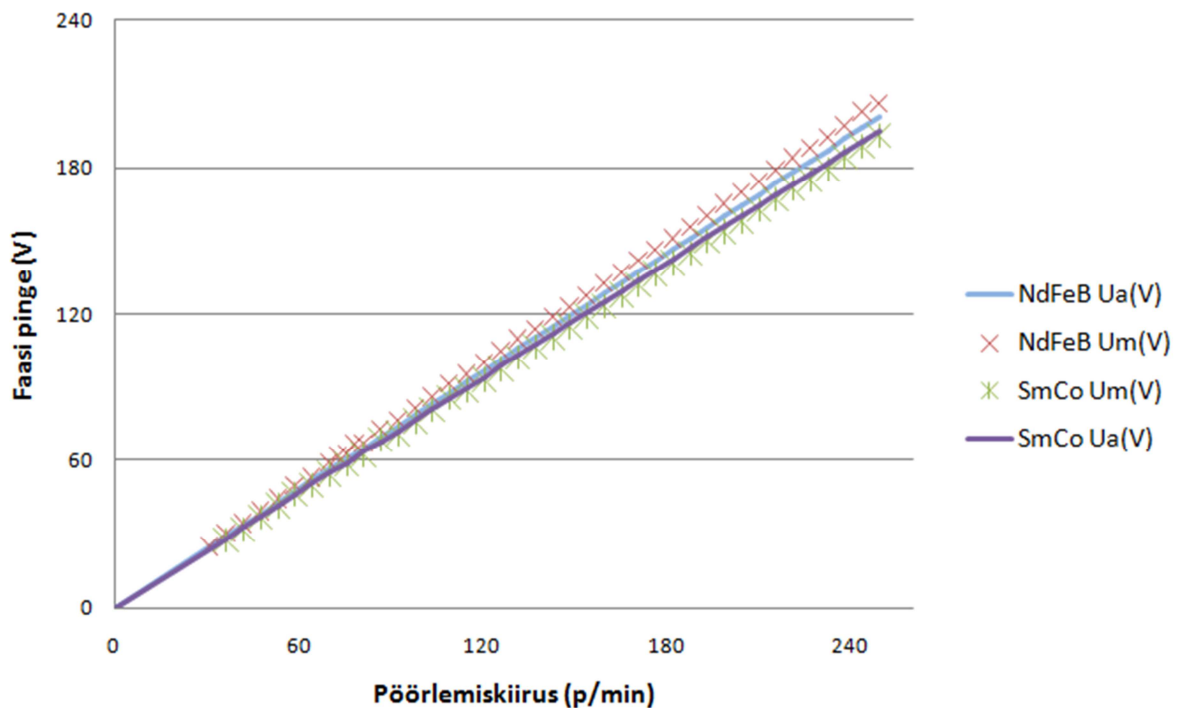
Joonis 9.1. Magnetvootihedus õhupilus kasutades NdFeB ja SmCo püsिमagnetitega rootorit ("m" tähistab mõõdetud tulemusi ja "s" tähistab simuleeritud tulemusi)

SmCo magneti mõõtetulemuste erinevus simuleeritud tulemustest võib olla põhjustatud ka sellest, et ostetud magnetid, mis paigaldati seadmele, ei vasta oma parameetritelt tellitutele. Jooniselt on näha, et NdFeB magnetitega sellist viga ei teki.

## 9.2 Tühijooksukatsetused

Tühijooksukatsetuste mõõtetulemused mõlema rootoriga on esitatud joonisel 9.2, kuhu on ka lisatud arvutatud väärtused. Madalatel pööratel on mõlema magnetiga kõik tulemused väga analoogsed, aga pöörlemiskiiruse suurenedes tekib erinevus sisse. 250 p/min juures on arvutatud tulemustel 5 V ja mõõdetud tulemustel 12 V erinevust. Mõlemal juhul on aga NdFeB tulemused kõrgemad.

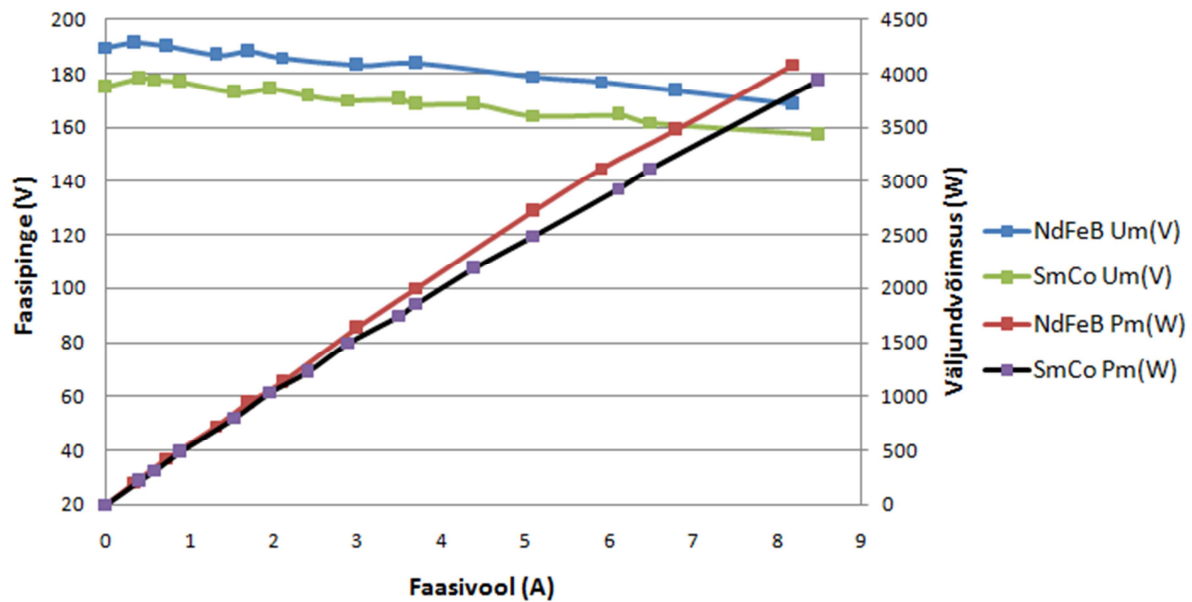
Nimipöörlemiskiirusel on SmCo püsिमagnetitega mõõtetulemus ainult 6% madalam kui NdFeB magnetitega. Selline elektromotoorjõu erinevus tuleneb sellest, et maksimaalne magnetvoo tihedus õhupilus oli samuti veidi erinev. Nii arvutatud kui mõõdetud tulemustega saab rahule jääda, nähes kui väike erinevus neil sees on.



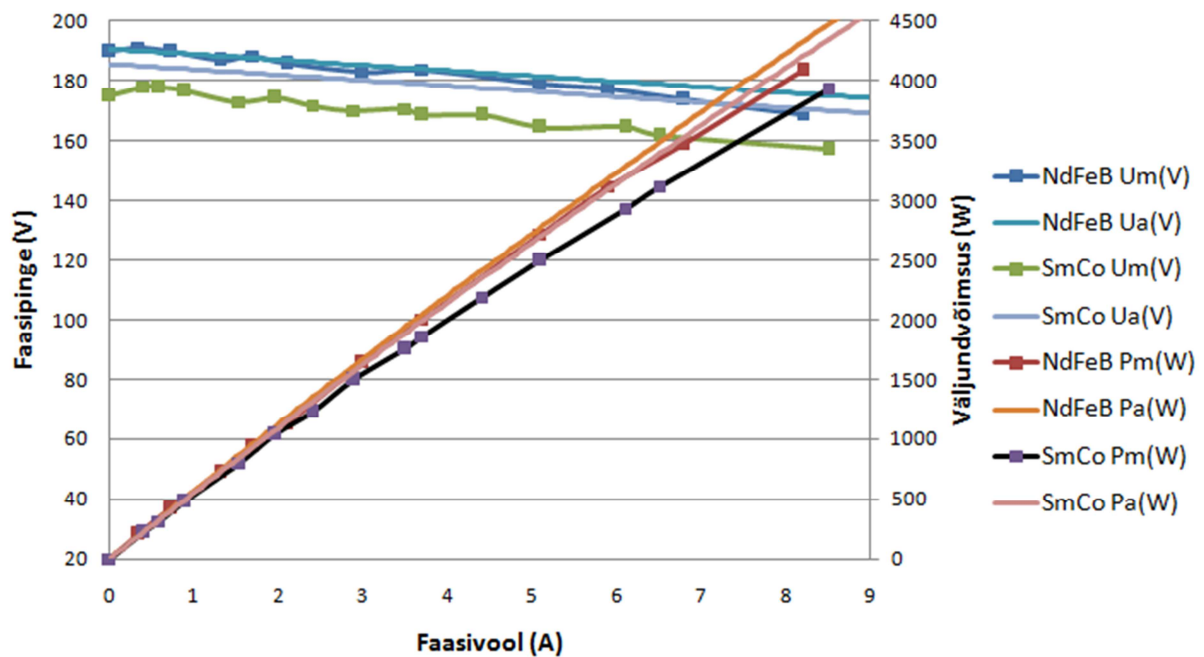
Joonis 9.2. SmCo ja NdFeB generaatori tühijooksu katse mõõtetulemused koos arvutatud tulemustega

### 9.3 Koormuskatsetused

Koormuskatsetuste mõõtetulemused mõlema rootoriga on esitatud joonisel 9.3. Lisaks on välja toodud koormuskatsetuse mõõtetulemused koos arvatatud väärtustega joonisel 9.4.



Joonis 9.3. SmCo ja NdFeB püsिमagnet rootoriga generaatori koormuskatsetuse mõõtetulemused koos arvatatud tulemustega



Joonis 9.4. SmCo ja NdFeB generaatori koormuskatsetuse mõõtetulemused koos arvatatud tulemustega

Joonistelt on näha, et mõlemal katsel mõõdetud faasipinge kahaneb koormuse suurenedes sama palju. Selline langus on põhjustatud mähise takistusest ja induktiivsusest. Pingelang on näivtakistuse ja voolu korrutis ja kuna vool suureneb, siis suureneb ka pingelang. Selgelt on näha, et pingekõverad langevad sarnaselt. Mõlemal juhul on 4 kW koormuse juures pinge langenud umbes 10%. See näitab, et staator on mõlemal katsetusel ühesugune ja väike magneti paksuse suurendamine ei ole olulisel määral muutnud induksiooni väärtust mähisel, mis põhjustaks pingekõverate erinevuse.

Suurema koormuse juures hakkavad mõlemad mõõdetud väljundpinged rohkem langema kui arvatult. See võib tuleneda soojenemisel tekkivatest lisakadudest. Selle vähendamiseks ning suurema koormuse kui 4 kW katsetamiseks peaks ehitama katsestendile sundjahutuse, mis simuleeriks generaatori tööoludele vastavat tuult.

## 10. KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärk oli katsetada ja võrrelda SmCo ja NdFeB püsिमagnetgeneraatoreid. Katsetused viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli elektrimasinate laboris. Katseseadmeks oli uurdevaba püsिमagnetitega aeglasekäiguline sünkroongeneraator.

Mõlema rootoriga sooritati tühijooksu- ja koormuskatsetused. Tühijooksukatsetel mõõdeti faasipingeid erinevatel pöörlemiskiirustel. Koormuskatsetel sooritati katsed nimipöörlemiskiirusel 230 p/min, koormates kõiki kolme faasi võrdsete aktiivkoormustega, samal ajal mõõtes väljundpingeid ning -voolusid. Lisaks mõõdeti mõlemal seadmel magnetvoo tihedus õhupilus.

Tulemustest on näha, et mõlema magnetiga on tulemused üsna sarnased ja vastavad projekteerimisel arvatatud tulemustele. Vähene erinevus tuli sisse SmCo magnetitega, mis võis juhtuda seetõttu, et tootja poolt saadetud magnetid ei vastanud tellitule.

SmCo magnetiga generaator vajab rohkem materjali, et olla väljundparameetritega võrdne NdFeB generaatoriga. Kui SmCo magneti hind on märgatavalt odavam, siis tasub generaatorisse paigaldamisel valida siiski see. Ta peab vastu kõrgematele temperatuuridele. See annab omakorda eelise tõsta mähise temperatuuri, mis tähendab, et sellega võib tõsta väljundvõimsust. Kõrgem temperatuuritaluvus on ka eeliseks, kui on vaja paigaldada seade ekstreemsemasse keskkonda. Eestis üldiselt selliseid ekstreemume ei toimu ja tuulikutes on traditsiooniliselt madalad temperatuurid. Meil on mõistlik kasutada NdFeB magneteid.

Tuleb mainida, et neid kahte tüüpi generaatorit ei ole veel piisavalt uuritud. Edaspidi on veel mitmeid aspekte, mida tuleb käsitleda. Esiteks tuleks uurida erinevate magnetmaterjalide tüüpide väljundparameetrite erinevusi: kui palju mõjutab tulemusi teiste parameetritega magneti valimine. Teiseks võiks katsetada erinevaid magnetite paigutusviise ning optimeerida masina disaini vastavalt kasutatavale magnetile. Kolmandaks tuleks hinnata kogu tuuliku süsteemi muutust, kui generaatori kaal ja gabariidid muutuvad vastavalt magneti valikule: kui palju muutub tuuliku enda hind ja konstruktsioon, kui vahetada magnet välja odavamaks, aga raskema vastu.



## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Eesti Energia kodulehekülg <http://www.energia.ee>. Vaadatud 20.05.2014.a.
2. S. Muller, M. Deicke, R. W. DeDoncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", IEEE Industry Application Magazine, vol. 8 no. 3, 2002, lk. 26...33.
3. K. Tuttelberg, T. Vaimann, A. Kallaste, "Analysis of a slow-speed slotless permanent magnet synchronous generator", 4th International Youth Conference on Energy, 2013, lk.1...4.
4. H. Polinder, F. van der Pijl, G. de Vilder, P. Tavner, "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines", IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005, lk. 543...550.
5. D. Banham-Hall, G. Taylor, C. Smith, M. Irving, "Towards large-scale direct drive wind turbines with permanent magnet generators and full converters", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010, lk. 1...8.
6. H. Polinder, D. Bang, R. van Rooij, A. McDonald, M. Mueller, "10 MW wind turbine direct-drive generator design with pitch or active speed stall control", IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007, lk. 1390...1395.
7. H. Li, Z. Chen, "Design optimization and comparison of large direct-drive permanent magnet wind generator systems", International Conference on Electrical Machines and Systems, 2007, lk. 685...690.
8. H. Karmaker, E. Chen, W. Chen, G. Gao, "Stator design concepts for an 8 MW direct drive superconducting wind generator", XXth International Conference on Electrical Machines, 2012, lk. 769...774.
9. A. Kallaste, "Low Speed Permanent Magnet Slotless Generator Development and Implementation for Windmills", Doktoritöö. – Tallinn: TTÜ elektriajamite ja jõuelektronika instituut, 2013.
10. <http://www.femm.info/wiki/Download>
11. K.J. Overshott, "Magnetism : itispermanent", IEE Proceedings-A, vol. 138, no. 1, January, 1991, lk. 22...30.
12. R. Petrie „Permanent magnets in review“, Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1993, lk. 207...210.

13. J. Pyrhönen, J. Nerg, P- Kurronen, J. Puranen, M. Haavisto, "Permanent Magnet Technology in Wind Power Generators", Electrical Machines (ICEM), XIX International Conference on Electrical Machines, 2010 , lk 1...6.
14. P. Sekerak, V. Hrabovcova, M. Onufer, L. Kalames, P. Rafajdus, "Synchronous Motors with Different PM Materials", Proceedings of the 9th International Conference, vol. 3, 2012, lk. 241...246.
15. J. F. Gieras, "Permanent magnet motor technology: Design and Applications", Third edition, CRC Press INC, 2010, lk. 1...43.
16. A. Kilk, "Paljupooluseline püsomagnetitega sünkroongeneraator tuuleagregaatidele" , Doktoritöö - Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2008.
17. H. Li, Z. Chen, "Overview of different wind generator systems and their comparisons", Renewable Power Generation, IET, vol 2 , Issue 2 , 2008, lk 123...138.
18. H. Polinder " Overview of and Trends in Wind Turbine Generator Systems", Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, 2011, lk 1...8.
19. A. Kallaste, A. Kilk, "Permanent magnet axial-flux generator with toroidal winding", Doctoral school of energy- and geo-technology, Kuressaare, 2007, lk 186...189
20. Alliance LLC kodulehekülj <http://www.allianceorg.com>. Vaadatud 01.04.2014.a.
21. S. Constantinides "The demand for rare earth materials in permanent magnets", Arnold Magnetic Technologies, 2012, lk. 1...15.

**L I S A D**

# Design of Slow-Speed Slotless SmCo Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Applications

Toomas Vaimann, Ants Kallaste, Norman Korn, Sten Laurit  
 Department of Electrical Engineering  
 Tallinn University of Technology  
 Tallinn, Estonia

**Abstract**—This paper presents the analysis of electrical parameters and design process of a novel slow-speed slotless permanent magnet synchronous generator. Main design criteria and the design process itself are explained. FEM calculations are carried out to check the validity of the analytical model and suitability of the chosen magnets to the generator. Test results of the prototype generator are analyzed and compared to the calculated values. Necessity of further analysis for the industrial use of such generators is presented.

**Keywords**—generators; magnetic circuits; magnetic flux; permanent magnet machines; variable speed drives; wind power generation.

## I. INTRODUCTION

Nowadays world moves more and more towards energy generation from renewable sources. One of the resources that seems to have a vast potential and is developed rapidly, is wind energy. This has also led to the development of electrical machines for the use in wind applications.

There are various generator types that are used in wind industry. The oldest and still one of the most used machine types in wind industry is the induction machine [1]. However, such solution usually needs the usage of a gearbox, which does not affect the reliability of the machines in the desired way and can become a drawback for the whole setup [2]. To raise the efficiency of the machines, more attention is paid to directly driven wind applications, due to which an increasing number of wind turbines have been developed to use directly coupled slow-speed generators [3]-[8]. Permanent magnet machines are most often used in such wind turbines [9].

Generators with high number of poles and small rotational speed have been designed to be used in wind applications, for which also a 5 kW permanent magnet generator has been designed [2], [3]. The designed machine is a radial flux generator characterized by a relatively large diameter and small axial length. Slotless design of the machine has been implemented in order to achieve minimal cogging torque. Windings of the stator are concentrated and housed in resin. Schematic of the generator is presented in Fig. 1 and Tab. 1 lists the most important parameters of the designed generator.

This work has been partially supported by project "Permanent magnets for sustainable energy application (MagMat)" receiving funding from the European Regional (Social) Fund under project 3.2.1101.12-0003 in Estonia.



Fig. 1. Constructional schematic of the designed generator.

TABLE I DATA OF THE DESIGNED GENERATOR

Parameter	Symbol	Value
Rated power	$P_n$	5 kW
Rated rotational speed	$n_n$	230 rpm
Rated voltage	$U_n$	240 V <sub>ac</sub>
Rated current	$I_n$	12.1 A <sub>ac</sub>
Number of stator coils	$Q_s$	24
Number of rotor poles	$Q_r$	40
Generator diameter	$d_g$	690 mm
Width of the air-gap	$d_{ag}$	2.5 mm

The main properties to be taken into account when choosing an appropriate permanent magnet for the design of electrical machines are the energy density, coercivity and remanence [10]. Ferrite and AlNiCo (aluminum-nickel-cobalt) magnets are far behind the other two most used magnetic materials from all points of view except for their price [10], [11]. SmCo (samarium-cobalt) has usually lower performance rates than NdFeB (neodymium-iron-boron) permanent magnets but at the same time it has its own advantages. These lay mainly in its temperature withstanding and thus SmCo is used in special applications, where NdFeB cannot be used. The maximum energy product of the four most used permanent magnet materials can be seen in Fig. 2. As the price of NdFeB has been very unsteady and has leaped during the last few years growing as high as 5-6 times [12], SmCo based magnets



where chosen to be suitable for the design of the generator described in this paper.

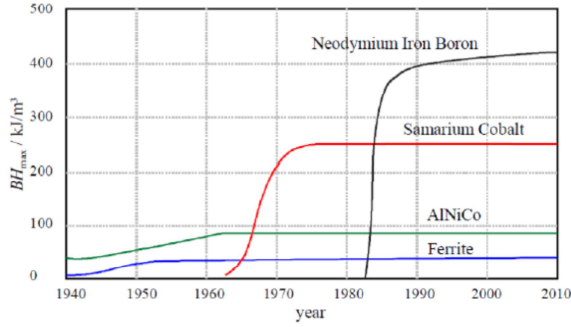


Fig. 2. Maximum energy product  $(BH)_{max}$  development of permanent magnet materials throughout the years [13].

## II. CONSTRUCTION AND MATHEMATICAL MODEL

Construction and mathematical model of the machine is based on the slow-speed slotless NdFeB permanent magnet machine design, which is described in previous papers of the authors [2], [3]. As the price of NdFeB magnets has not been stable during the last few years, replacing possibilities of NdFeB magnets with SmCo magnets were investigated. Main criterion for the magnet replacement was not to change the machine output parameters in a significant manner. The goal was set to use the same stator design for SmCo magnet machine as in previous NdFeB prototype. This means that only the rotor part had to be redesigned to be suitable for the use of SmCo magnets.

Construction of the machine is presented in Fig. 3. The stator consists of stator yoke, which is made from electrical steel, and coils, which are designed as concentrated windings placed on the surface of the stator yoke and housed in resin. It should be noted that the machine design has no slots in the stator, resulting in an almost smooth stator inner surface. This means that the magnetic reactance of the machine remains the same in every position of the rotor. Additionally, there is no occurrence of cogging torque due to the slotless design. Rotor of the machine consists of a rotor yoke on which the permanent magnets are fixed.

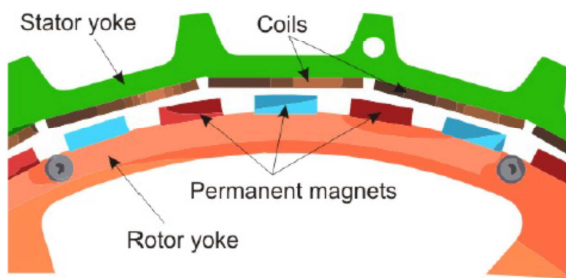


Fig. 3. Principle schematic of the generator.

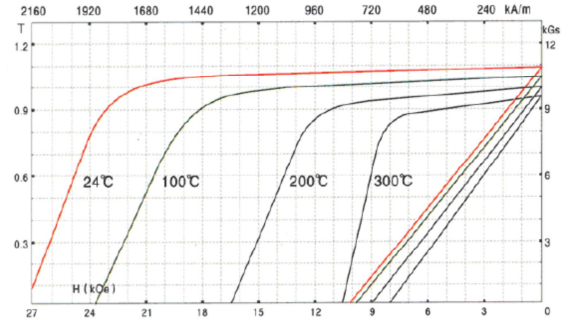


Fig. 4. Demagnetization curve of used  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  grade 28 magnets.

In order to use SmCo magnets instead of NdFeB magnets, an assumption was made that the same generator stator can be used as is in NdFeB generator. This requirement can be fulfilled only if the magnetic flux in the air-gap will remain the same with the replacement of magnetic material.  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  grade 28 magnets were chosen to be suitable for the design. Demagnetization curve of these magnets is presented in Fig. 4. The remanence of SmCo magnet is smaller than in the NdFeB magnets used in the previous prototype. This means that the new magnets have to be larger in dimensions in order to be able to produce the same amount of energy.

Knowing the number of poles  $p$  of the machine, it is possible to approximate the needed volume of magnets  $V_m$ . The volume of all the needed magnets in the generator can be found as follows:

$$V_m = 2k_p k_g \cdot \frac{\pi \tau}{0.5 A B_n p^2}, \quad (1)$$

where  $A$  is the linear current density of the machine,  $\tau$  is the required torque of the machine,  $B_n$  is the flux density in the air-gap,  $k_p$  describes the magnet length ratio to the pole length, and  $k_g$  describes the air-gap ratio to the pole length.

When the validity of Eq. 1 is compared to the NdFeB machine, all parameters except  $k_g$  and  $k_p$  are exactly the same for the design of SmCo machine. Air-gap and magnet length ratio to the pole length ( $k_g$  and  $k_p$ ) is changing, because the energy density of SmCo magnets is lower than the one of NdFeB magnets. So in order to get the same amount of energy flowing through the air-gap, height and width of the magnet had to be raised. To define the value of  $k_g$  and  $k_p$ , magnetic field calculations were performed and it was found that the height of the magnets has to be raised 1.5 times and width 1.4 times. The resulting dimensions of the needed SmCo magnets were found to be 40x55x15 mm.

Attention should be paid to the fact that with the replacement of the magnets, also the machine total air-gap parameters are changing, resulting in the change of coil inductances in the stator. On the other hand, as the machine has a relatively large air-gap (total air-gap consists of magnet height, clearance between the stator and rotor and height of winding) and the change is not significant, it was assumed that

the effect of described changes to machine parameters is also minor.

### III. FEM ANALYSIS

As the length of the studied machine pole is significantly greater than the width of the pole, an assumption was made that it is sufficient to carry out the generator magnetic field analysis in one plane as a two-dimensional calculation. Also as the studied generator radius is significantly greater than the pole length, it is possible to simplify the magnetic field calculations by assuming the machine to be linear. According to the simplifications, the studied machine plane model was constructed. Since the machine pole distribution is symmetrical, it is enough to complete the magnetic field calculations using only half of the magnetic pole, as the field symmetry is ensured with the boundary conditions.

Freeware software FEMM 4.2 was used to carry out the FEM calculations of the generator. FEM calculation results of the magnetic flux density distribution and flux lines are shown in Fig. 5. It was found from the calculation results that the maximum magnetic flux density in the generator rotor yoke was 1.2 T and maximum magnetic flux density for the stator yoke was 1.1 T. As the saturation point for electrical steel and iron is greater than the calculated values in stator and rotor yokes, it can be concluded that the generator iron parts will not be saturated. Magnetic flux density in the air-gap was found to be 0.6 T. Distribution of magnetic flux density in the air-gap is presented in Fig. 6.

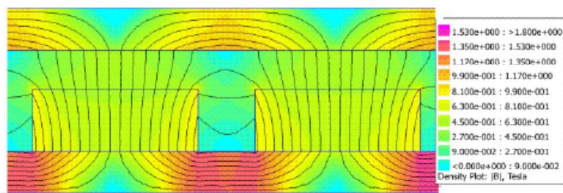


Fig. 5. Magnetic flux density distribution and flux lines of the generator.

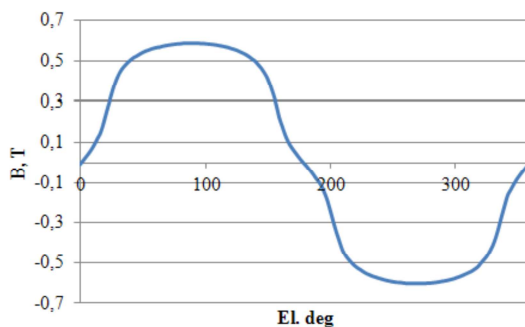


Fig. 6. The magnetic flux density spatial distribution over the length of a single pole pair in the radial direction.

### IV. TEST RESULTS

Based on the calculations, a prototype machine was built and tested. The experiments were carried out in the Electrical Machines Laboratory of the Department of Electrical Engineering at Tallinn University of Technology. Test generator with the driving machine can be seen in Fig. 7. No load and load characteristics on the machine were studied and coil parameters were measured during the tests. No load test was performed using different levels of rotational speed and phase output voltage was measured. Load test was performed at a constant speed, symmetrical resistive load was applied during which generator output voltage and current was measured.

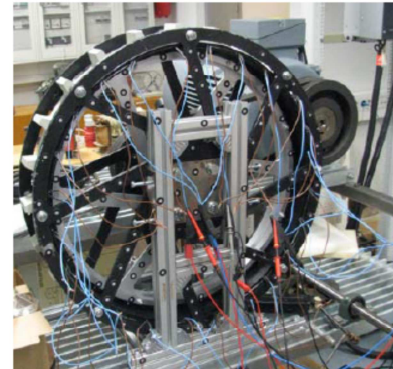


Fig. 7. Generator in the testbench.

No load test results are presented in Fig. 8. The aim of the test was to verify that all generator phases are connected correctly and that phase and line voltages are symmetrical. Also, as the open circuit voltage corresponds to the generator EMF value, this test allows verifying the generator EMF calculation methodology. It can be seen from Fig. 8 that at nominal rotational speed of 230 rpm, generator phase EMF is 180 V, which corresponds well to calculated value.

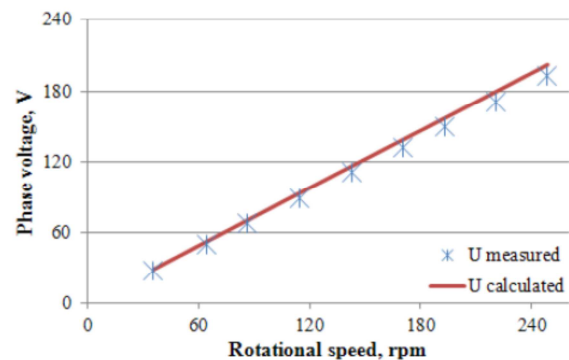


Fig. 8. Generator no load test results.

Load test results are presented in Fig. 9. Generator load test was carried out in order to investigate the output characteristics and behavior of the generator during the loading. Also this test



allows validating the calculation methodology. As it can be seen from Fig. 9, the generator output voltage is decreasing with the application of more load and at rated load it is 28% smaller than the EMF. The drop in the phase voltage is caused by the coil resistances and inductances. At the rated load of 12.7 A the generator output phase voltage is 140 V, which corresponds to the calculated value.

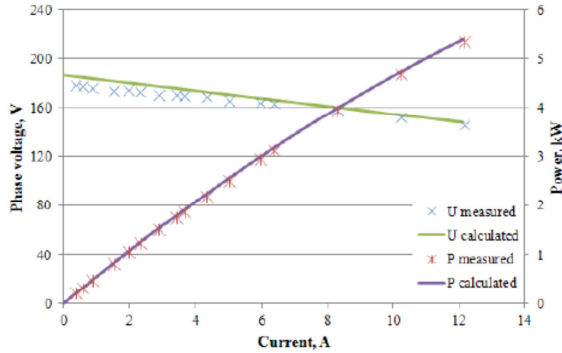


Fig. 9. Generator load test results.

## V. CONCLUSION

In this paper, design of a novel slow-speed slotless directly driven SmCo generator was investigated. The SmCo generator design was based on a previous NdFeB prototype generator. Calculations of the machine were carried out, based on which a prototype generator was built and tested. Testing of the machine proved the results corresponds to the calculated values.

It was found that if needed, SmCo permanent magnets can be implemented to the permanent magnet synchronous generator instead of NdFeB magnets. However, it must be noted that with this replacement, the mass of magnetic material is rising, which means that the rotor construction and the construction of the whole wind application, where the generator is meant to be used, must endure extra weight. Due to the possible necessary changes in the construction, economic point of view of such replacement must be analyzed.

## ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to thank My!Wind Llc for their help and support in the building of the prototype generator.

## REFERENCES

- [1] S. Muller, M. Deicke, and R. W. DeDoncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines," *IEEE Industry Application Magazine*, vol. 8 no. 3, 2002, pp. 26-33.
- [2] A. Kallaste, T. Vaimann, and O. Pabut, "Slow-speed ring-shaped permanent magnet generator for wind applications," 11th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II", 2012, pp. 66-69.
- [3] K. Tuttelberg, T. Vaimann, and A. Kallaste, "Analysis of a slow-speed slotless permanent magnet synchronous generator," 4th International Conference on Energy, 2013, pp. 1-4.
- [4] H. Polinder, F. van der Pijl, G. de Vilder, and P. Tavner, "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 2005, pp. 543-550.
- [5] D. Banham-Hall, G. Taylor, C. Smith, and M. Irving, "Towards large-scale direct drive wind turbines with permanent magnet generators and full converters," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2010, pp. 1-8.
- [6] H. Polinder, D. Bang, R. van Rooij, A. McDonald, and M. Mueller, "10 MW wind turbine direct-drive generator design with pitch or active speed stall control," *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2007, pp. 1390-1395.
- [7] Hui Li and Zhe Chen, "Design optimization and comparison of large direct-drive permanent magnet wind generator systems," *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2007, pp. 685-690.
- [8] H. Karmaker, E. Chen, W. Chen, and G. Gao, "Stator design concepts for an 8 MW direct drive superconducting wind generator," *XXth International Conference on Electrical Machines*, 2012, pp. 769-774.
- [9] N. Bianchi and A. Lorenzoni, "Permanent magnet generators for wind power industry: an overall comparison with traditional generators," *International Conference on Opportunities and Advances in International Electric Power Generation*, 1996, pp. 49-54.
- [10] T. Vaimann, A. Kallaste, A. Belahcen, and A. Kilk, "Magnetic properties of reduced Dy NdFeB permanent magnets and their usage in electrical machines," *IEEE AFRICON Conference*, 2013, pp. 1124-1128.
- [11] P. Sekerak, V. Hrabovcova, M. Onufer, L. Kalames, and P. Rafajdus, "Synchronous motors with different PM materials," 9th International Conference - 2012 ELEKTRO, vol. 3, 2012, pp. 241-246.
- [12] Asianmetal, June 2010, <http://www.asianmetal.com/>.
- [13] Material of Magnet Technology Center at Priztech Ltd.

# Comparative study of slow-speed slotless synchronous generator using SmCo and NdFeB permanent magnets

Norman Korn, Toomas Vaimann, Ants Kallaste, AnouarBelahcen

**Abstract**—This paper presents the analysis of electrical parameters of a novel slow-speed slotless permanent magnet synchronous generator. Calculations and analyses are based on generator construction using SmCo permanent magnets in one and NdFeB permanent magnets in other case. Some of the design parameters are calculated and a simplified analytical mathematical model of the generator is constructed to calculate the output variables under different operational conditions. FEM calculations are carried out to check the validity of the analytical model. Test results are analyzed and compared to the calculated values. Finally, the analytical model is evaluated and final output parameters of the generator are determined. Comparison between the usage possibilities of SmCo and NdFeB magnets is given.

**Index Terms**— neodymium, permanent magnet machines, samarium, wind energy generation

## I. INTRODUCTION

Nowadays world moves more and more towards energy generation from renewable sources. One of the resources that seems to have a vast potential and is developed rapidly, is wind energy. This has also lead to the development of electrical machines for the use in wind applications.

There are various generator types that are used in wind industry. The oldest and still one of the most used machine types in wind industry is the induction machine [1]. However, such solution usually needs the usage of a gearbox, which does not affect the reliability of the machines in the desired way and can become a drawback for the whole setup [2]. To raise the efficiency of the machines, more attention is paid to directly driven wind applications, due to which an increasing number of wind turbines have been developed to use directly coupled slow-speed generators [3]-[8]. Permanent magnet machines are most often used in such wind turbines [9].

Generators with high number of poles and small rotational speed have been designed to be used in wind applications, for which also a 5 kW permanent magnet generator has been designed [2], [3]. The designed machine is a radial flux generator characterized by a relatively large diameter and small axial length. Slotless design of the machine has been implemented in order to achieve minimal

cogging torque. Windings of the stator are concentrated and housed in resin. Schematic of the generator is presented in Fig. 1 and Tab. 1 lists the most important parameters of the designed generator.



Fig. 1. Constructional schematic of the designed generator.

TABLE I. DATA OF THE DESIGNED GENERATOR

Parameter	Symbol	Value
Rated power	$P_n$	5 kW
Rated rotational speed	$n_n$	230 rpm
Rated voltage	$U_n$	240 V <sub>ac</sub>
Rated current	$I_n$	12,1 A <sub>ac</sub>
Number of stator coils	$Q_s$	24
Number of rotor poles	$Q_r$	40
Generator diameter	$d_g$	690 mm
Width of the air-gap	$d_{ag}$	2.5 mm

## II. PERMANENT MAGNETS

The main properties to be taken into account when choosing an appropriate permanent magnet for the design of electrical machines are the energy density, coercivity and remanence [10]. Commercially there are mainly four types of magnet material available, which can be used for machine design: NdFeB – neodymium-iron-boron magnets, SmCo – samarium cobalt magnets, AlNiCo – aluminium-nickel-cobalt magnets and ferrite magnets. The maximum energy product of the four most used permanent magnet materials can be seen in Fig. 2.

As can be seen from Fig. 2, NdFeB magnets have the highest energy density, meaning that they should be most suitable for the machine design. SmCo magnets have lower energy density compared to the NdFeB magnets but from the environmental point of view they have their advantages. These lay mainly in its temperature withstanding and thus SmCo is used in special applications, where NdFeB cannot be used.

Choosing the magnets for electrical machine design also economical point of view has to be taken into account

This paper has been supported by Estonian Ministry of Education and Science base financing fund (project „Design and Optimization Methodology for Electrical Machine-Drives“).

N. Korn, A. Kallaste, T. Vaimann and A. Balahcenare with the Department of Electrical Engineering, Tallinn University of Technology, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn, Estonia (e-mail: norman.korn@gmail.com; ants.kallaste@ttu.ee; toomas.vaimann@ttu.ee; anouar.belahcen@ttu.ee).



besides previously given parameters. The price of rare earth magnets has been very unsteady over the years as it can be seen on Fig 3. In August of 2011 the price of NdFeB was nearly twice as high as SmCo. By now the prices have decreased and equalized. Meanwhile the SmCo price has been quite stable meaning that it is much easier to predict the machine production price. This is also one reason why in this paper is taken under investigation two type of magnets, NdFeB and SmCo magnets, used in similar machine with same output characteristics.

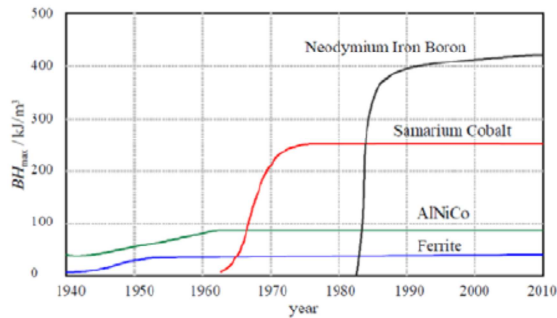


Fig. 2. Maximum energy product  $(BH)_{max}$  development of permanent magnet materials throughout the years [11].

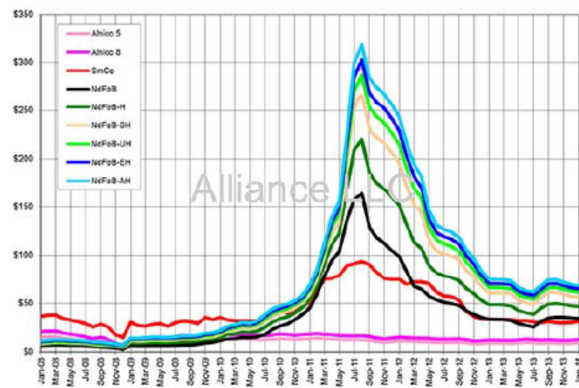


Fig. 3. Magnet cost (per kg) based only on main raw materials [12].

For the generator design there was chosen NdFeB grade N42 and  $Sm_2Co_{17}$  grade 28 permanent magnets. As the SmCo magnets have lower energy density compared to the NdFeB magnets, the volume of SmCo has to be larger than NdFeB magnets volume in order to get the same amount of energy through the generator air-gap. Even though the maximum energy density of NdFeB magnet is higher by just 55% compared to the SmCo magnet, it was found from the study that the SmCo volume has to be 110 % higher than chosen NdFeB magnets volume. To increase the volume of SmCo magnets, magnet height was increased 1.5 times and width 1.4 times compared to the NdFeB magnets. From the economical point of view, not only increase in the volume of the magnets but also the increase of the total weight of the machine has to be taken into account.

### III. FEM ANALYSIS

As the length of the studied machine pole is significantly greater than the width of the pole, an assumption was made that it is sufficient to carry out the generator magnetic field analysis in one plane as a two-dimensional calculation. Also, as the studied generator radius is significantly greater

than the pole length, it is possible to simplify the magnetic field calculations by assuming the machine to be linear. According to the simplifications, the studied machine plane model was constructed. Since the machine pole distribution is symmetrical, it is enough to complete the magnetic field calculations using only half of the magnetic pole, as the field symmetry is ensured with the boundary conditions.

Freeware software FEMM 4.2 was used to carry out the FEM calculations of the generator. FEM calculation results of the magnetic flux density distribution and flux lines are shown in Fig. 4 for the NdFeB magnet machine and Fig. 5 for the SmCo magnet machine.

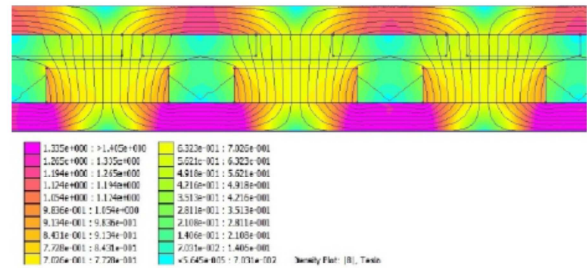


Fig. 4. Magnetic flux density distribution and flux lines of the generator using NdFeB magnets.

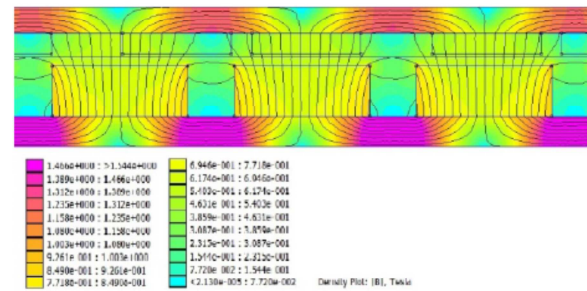


Fig. 5. Magnetic flux density distribution and flux lines of the generator using SmCo magnets.

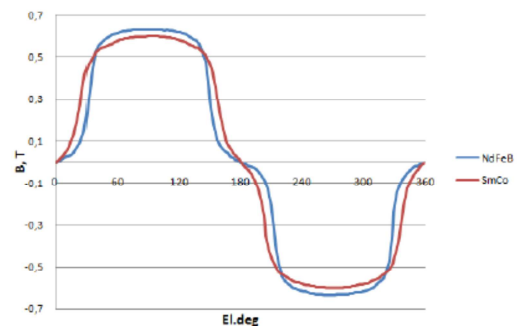


Fig. 6. The magnetic flux density spatial distribution over the length of a single pole pair in the radial direction.

From the FEM calculation, magnetic flux density distribution in the air-gap over the polepair was found, which is given in the Fig. 6. As can be seen from the Fig. 6, the flux density is slightly higher for NdFeB machine but it is narrower compared to the SmCo machine. Maximum flux density for both machines is approximately 0.6 T in the air-gap. There is little difference in the flux density but in overall they are relatively similar.

#### IV. TEST RESULTS

The experiments were carried out in the Electrical Machines Laboratory of the Department of Electrical Engineering at Tallinn University of Technology. Test generator with the driving machine can be seen in Fig. 7. No load and load characteristics on the machine were studied and coil parameters were measured during the tests. No load test was performed using different levels of rotational speed and phase output voltage was measured. Load test was performed at a nominal speed, symmetrical resistive load was applied during which generator output voltage and current was measured.

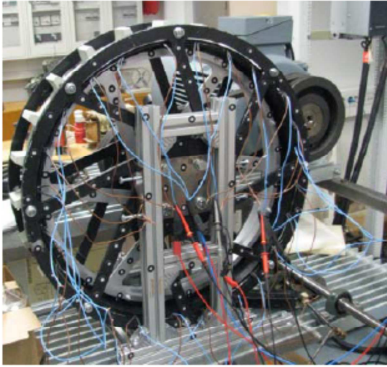


Fig. 7. SmCogenerator in the testbench

Before no load test, magnetic flux density in the air-gap was measured and they are given in Fig. 8. Similarly to the FEM calculation (Fig. 6) the NdFeB machine flux density is higher than in case of SmCo machine flux density in the air-gap. If Fig. 6 and Fig. 8 are compared, slight difference in the shape of flux density can be seen, but the maximum values correspond well between the measured and calculated values. The difference between the calculated and measured values can be explained by the simplifications in the FEM model and measurement accuracy.

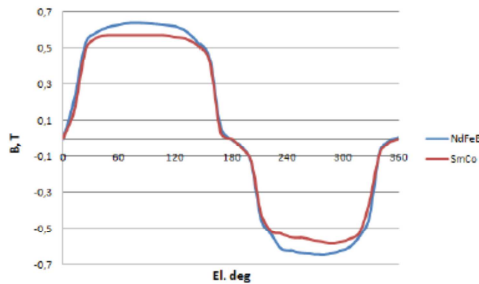


Fig. 8. Measured magnetic flux density spatial distribution over the length of a single pole pair in the radial direction.

No load test results for both rotor types are presented in Fig. 9 where additionally calculated no load curves are presented. It can be seen from Fig. 9 that at nominal rotational speed of 230 rpm, generator measured phase EMF is 190 V with NdFeB magnets and 180 V with SmCo magnets. The difference between those voltages was expected as there was slight difference between the maximum values of the magnetic flux density in the air-gap. In overall it can be said that the measured results correspond well to the calculated values.

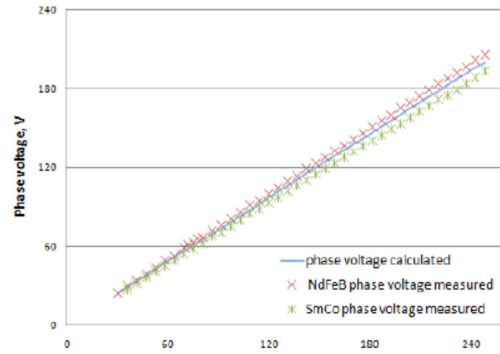


Fig. 9. Generator no load test results

Load test results are presented in Fig. 10 for the NdFeB magnet machine and in Fig. 11 for the SmCo machine. Generator load test was carried out in order to investigate the output characteristics and behavior of the generator during the loading.

As it can be seen in Figs. 10 and 11, the generator output voltage is decreasing with the application of more loads for both types of magnets that were used. The drop in the phase voltage is caused by the coil resistances and inductances. For both cases the output voltage decreased approximately 16% with rated load. It can be seen that in case of both generators the measured results correspond quite well with the calculated ones. Slight difference between the calculated and measured results may come from the simplifications made in the machine magnetic field calculation and coil inductance calculations.

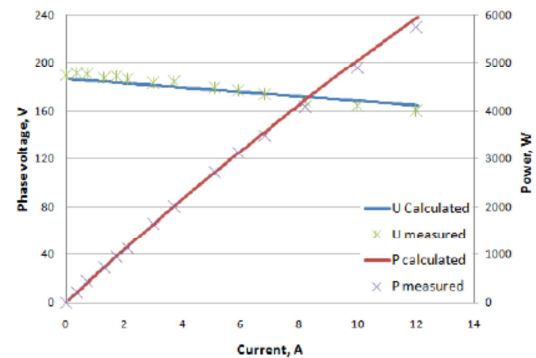


Fig. 10. Load test results using NdFeB permanent magnets.

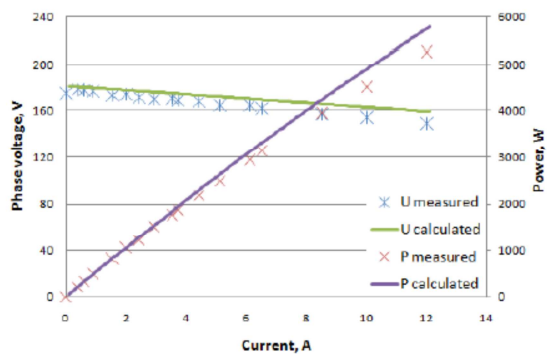


Fig. 11. Load test results using SmCo permanent magnets.



## V. CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this paper a slow-speed slotless synchronous generator using NdFeB and SmCo permanent magnets was investigated. Principle for choosing the magnets was presented and the machine FEM calculations were presented as well as comparison was made between the results. Additionally, the generator with both magnets was tested and the results were presented.

From the calculation and test results it was found that both types of magnets can be used for the machine with the same type of stator. It was found that there is a slight difference between electrical parameters between those two machines. However, it can be said that from electrical point of view the machines are similar and comparable. From the mechanical point of view the SmCo machine will be heavier as more magnet material mass compared to the NdFeB machine is needed.

From the economical point of view, the difference between the generators is difficult to evaluate, as the NdFeB magnets price has changed a lot. When the NdFeB price was at its peak, the SmCo magnets were one of the possible alternatives for the NdFeB magnets. When the prices of the materials are leveled, NdFeB magnets would be preferred for this type of machine.

Next steps of the work there are the thermal tests of the machines, in order to evaluate the change of machine characteristics in case of maximum allowed temperature of the used magnets and coils. Also, economical study to evaluate the whole cost of the wind turbine system, in case of replacing NdFeB magnets with lower grade magnets, is planned to be carried out.

## ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to thank My!WindLlc for their help and support in the building of the prototype generator.

## REFERENCES

- [1] S. Muller, M. Deicke, and R. W. DeDoncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines," *IEEE Industry Application Magazine*, vol. 8 no. 3, 2002, pp. 26-33.
- [2] A. Kallaste, T. Vaimann, and O. Pabut, "Slow-speed ring-shaped permanent magnet generator for wind applications," 11th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II", 2012, pp. 66-69.
- [3] K. Tuttelberg, T. Vaimann, and A. Kallaste, "Analysis of a slow-speed slotless permanent magnet synchronous generator," 4th International Youth Conference on Energy, 2013, pp. 1-4.
- [4] H. Polinder, F. van der Pijl, G. de Vilder, and P. Tavner, "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 2005, pp. 543-550.
- [5] D. Banham-Hall, G. Taylor, C. Smith, and M. Irving, "Towards large-scale direct drive wind turbines with permanent magnet generators and full converters," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2010, pp. 1-8.
- [6] H. Polinder, D. Bang, R. van Rooij, A. McDonald, and M. Mueller, "10 MW wind turbine direct-drive generator design with pitch or active speed stall control," *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2007, pp. 1390-1395.
- [7] Hui Li and Zhe Chen, "Design optimization and comparison of large direct-drive permanent magnet wind generator systems," *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2007, pp. 685-690.
- [8] H. Karmaker, E. Chen, W. Chen, and G. Gao, "Stator design concepts for an 8 MW direct drive superconducting wind generator," *XXth International Conference on Electrical Machines*, 2012, pp. 769-774.
- [9] N. Bianchi and A. Lorenzoni, "Permanent magnet generators for wind power industry: an overall comparison with traditional generators," *International Conference on Opportunities and Advances in International Electric Power Generation*, 1996, pp. 49-54.
- [10] T. Vaimann, A. Kallaste, A. Belahcen, and A. Kilk, "Magnetic properties of reduced DyNdFeB permanent magnets and their usage in electrical machines," *IEEE AFRICON Conference*, 2013, pp. 1124-1128.
- [11] Material of Magnet Technology Center at Prizztech Ltd.
- [12] Alliance LLC, March 2014, <http://www.allianceorg.com/>.

## BIOGRAPHIES

**Norman Kornwas** born in Saue, Estonia in 1989 and received his BSc degree in electrical power engineering from Tallinn University of Technology in 2012. He is currently a master's student in Tallinn University of Technology.

He is currently working for Teleplan Estonia OÜ as a technician.

**Toomas Vaimann** was born in Pärnu, Estonia, in 1984 and received his BSc and MSc degrees in electrical engineering from Tallinn University of Technology, Estonia, in 2007 and 2009 respectively. He is currently a PhD student in Tallinn University of Technology Department of Electrical Engineering.

He has been working in several companies as an electrical engineer. Presently he is working at the Tallinn University of Technology Department of Electrical Engineering as an engineer.

His main research interests include diagnostics of electrical machines.

**Ants Kallaste** was born in Pärnu, Estonia in 1980 and received his BSc and MSc degrees in electrical engineering from Tallinn University of Technology, Estonia, in 2004 and 2006 respectively. He is currently a PhD student in Tallinn University of Technology Department of Electrical Engineering.

He has been working in several companies as an electrical engineer.

Presently he is working at the Tallinn University of Technology Department of Electrical Engineering on a researcher's position.

His main research interests include PM machine design and wind turbines.

**Anouar Belahcen** was born in Morocco, in 1963. He received the B.Sc. degree in physics from the University Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fes, Morocco, in 1988 and the M.Sc. (Tech.) and Doctor (Tech.) degrees from Helsinki University of Technology, Finland, in 1998, and 2004, respectively. From 2008 to 2013, he has been working as Adjunct Professor in the field of coupled problems and material modeling at Aalto University, Finland. Since 2011 he is Professor of electrical machines at Tallinn University of Technology, Estonia and in 2013 he became Professor of Energy and Power at Aalto University.

His research interest are numerical modeling of electrical machines, especially magnetic material modeling, coupled magnetic and mechanical problems, magnetic forces, and magnetostriction.