



Høgskulen  
på Vestlandet

# BACHELOROPPGAVE

BO24EB-50

Brushless Doubly-fed Induction Machine

**Sevre-Julian Martinsen Hopp**

**Adrian Kvernenes Jakobsen**

ELE350 Bacheloroppgave

Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap

Veileder: Lasse Hugo Sivertsen

Innleveringsdato: 21. mai

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1.

## Dokumentkontroll

<i>Rapportens tittel:</i> Brushless Doubly Fed Induction Machine	<i>Dato/Versjon</i> 20. mai. 2024/0.12
	<i>Rapportnummer:</i> B024EB-50
<i>Forfatter(e):</i> Adrian Kvernenes Jakobsen Sevre-Julian Martinsen Hopp	<i>Studieretning:</i> ELK21
	<i>Antall sider m/vedlegg</i> 50
<i>Høgskolens veileder:</i> Lasse Hugo Sivertsen	<i>Gradering:</i> Åpen
<i>Eventuelle Merknader:</i> Vi tillater at oppgaven kan publiseres.	

<i>Oppdragsgiver:</i> Høgskulen på Vestlandet	<i>Oppdragsgivers referanse:</i>
<i>Oppdragsgivers kontaktperson(er) (inkludert kontaktinformasjon):</i> Lasse Hugo Sivertsen lasse.hugo.sivertsen@hvl.no	

Revisjon	Dato	Status	Utført av
0.10	03.05.2024	Første utkast	Alle
0.11	10.05.2024	Andre utkast	Alle
0.12	20.05.2024	Ferdig oppgave	Alle

## **Forord**

Denne bacheloroppgaven markerer avslutningen på vår utdanning i elkraftteknikk ved Høgskulen på Vestlandet, campus Bergen.

Arbeidet med denne oppgaven har gitt oss verdifull praktisk erfaring og dypere innsikt i et område innenfor elkraft som vi har stor interesse for. Å anvende teoretisk kunnskap på et praktisk prosjekt har forbedret vår forståelse av faget og økt vår kapasitet til å håndtere tekniske utfordringer.

Vi ønsker å rette en takk til vår veileder, Lasse Hugo Sivertsen, for hans tilgjengelighet til spørsmål og diskusjoner. Vi er også takknemlige for laboratorieansvarlig, Lars Manger Ekroll, som har vært en støtte i vårt daglige arbeid og har spilt en kritisk rolle i anskaffelsen av utstyr og oppbyggingen av laboratoriemodellen.

## Sammendrag

Vindkraft er mye i fokus ettersom det er en tilgjengelig fornybar ressurs. Det er dermed stor interesse for å utvikle nye systemer og forbedre de eksisterende teknologiene innen feltet. I dag brukes dobbeltmatede induksjonsgeneratorer (DFIG) ofte i vindparker. Disse er utstyrt med børster og sleperinger som krever regelmessig vedlikehold og fører til høye kostnader. Børsteløs dobbeltmatede induksjonsgenerator (BDFIG) utforskes som et alternativ grunnet den børsteløse konstruksjonen. I denne oppgaven har vi undersøkt BDFIG maskinteknikk og forsøkt å lage en operativ lab-modell. Målet var å teste ytelse og utrede maskinteknikk om BDFIG.

Vi har avgrenset den opprinnelige oppgaven, ettersom den i utgangspunktet var meget åpen og det er maskintekniske aspekter som krever spesialkompetanse for å utrede i detalj.

Oppgaven består av teori fra litteratursøk og lab-testing. Teoridelen legger til grunn den kunnskapen vi fant mest sentral for vår forståelse av BDFIG, samt hvordan eksisterende konfigurasjoner av BDFIG er lagt opp.

Lab-testingen tar for seg hvordan vi har lagt opp og koblet lab-modellen, samt hvilke problemer vi opplevde og observasjonene vi gjorde. Den tar også for seg hvilke anbefalinger vi kommer med til fremtidig testing av modell.

I konklusjonen legger vi frem de maskintekniske funnene om BDFIG fra litteraturstudiet, sammen med våre erfaringer fra laboratoriearbeidet.

# Innholdsfortegnelse

Dokumentkontroll.....	2
Forord.....	3
Sammendrag.....	4
Innholdsfortegnelse.....	5
Figuroversikt.....	6
Tabelloversikt.....	6
1. Innledning.....	7
1.1 Oppdragsgiver.....	7
1.2 Problemstilling.....	7
2. Kravspesifikasjon.....	8
3. Litteraturgjennomgang.....	9
3.1 Doubly Fed Induction Generator.....	9
3.1.1 Hva er DFIG.....	9
3.1.2 Elektromagnetisk induksjon (Faradays lov).....	9
3.1.3 Rotor.....	10
3.1.4 Børster og sleperinger.....	10
3.2 BDFIG.....	12
3.2.1 Stator.....	12
3.2.2 UMP.....	14
3.2.3 Rotor.....	15
3.2.4 Ekvivalentkrets.....	18
3.2.5 Driftsmoduser.....	18
3.2.6 Sub- og supersynkron drift.....	20
3.2.7 Tap i BDFIG.....	22
3.3 Sammenligning.....	24
4. Utstyr til lab-modell.....	26
4.1 Generatoren.....	26
4.2 Frekvensomformer.....	27
4.3 Lab-modell.....	28
5. Ytelses- og parameteresting.....	30
5.1 Ytelse.....	30
5.2 Parameterestimering.....	32
5.2.1 DC-Test.....	32
5.2.2 Låst rotor test (Blocked rotor test).....	33
5.2.3 Tomgang test (No-load test).....	33
6. Laboratoriearbeid.....	35
6.1 Praktisk utførelse.....	35
6.2 Videre arbeid.....	41
7. Konklusjon.....	43
8. Forkortelser.....	45
9. Fremdriftsplan.....	46
10. Referanser.....	47

## Figuroversikt

Figur 1: DFIG skisse.	9
Figur 2: Rotor med børster og sleperinger.	11
Figur 3: BDFIG skisse.	12
Figur 4: PW ligger nærmest luftgapet.	13
Figur 5: Senter av rotor (a) er ikke i senter av stator (b).	15
Figur 6: Fluktetthet ved UMP. Tilpasset fra [6].	15
Figur 7: Nested loop arrangement-skisse.	17
Figur 8: Nested loop + cage arrangement skisse.	17
Figur 9: Per-fase Ekvivalentskjema BDFIM.	18
Figur 10: Supersynkron drift, effektflyt.	21
Figur 11: Subsynchron drift, effektflyt.	22
Figur 12: Tap i BDFIG.	23
Figur 13: Måling av virkningsgrad. Hentet fra [4].	25
Figur 14: Lønne-Motor.	26
Figur 15: Merkeskilt til maskin.	26
Figur 16: Omformer	27
Figur 18: Koblingsskjema BDFIG.	28
Figur 19: Koblingsskjema drivmaskin.	29
Figur 20: DC-Test måleoppsett	33
Figur 21: Blocked rotor test og No-load test måleoppsett	34
Figur 22: Laboratorie oppsett.	35
Figur 23: Turtallsmåler montert på BDFIG aksling.	36
Figur 24: Koblingsskjema med turtallsmåling.	37
Figur 25: Encoder turtallsmåling sammenlignet med turtall fra omformer ved motordrift.	37
Figur 26: Strøm og turtall ved DTC ID run, ikke bestått.	38
Figur 27: Bestått ID run, Normal, Scalar.	38
Figur 28: Oppdatert koblingsskjema.	39
Figur 29: BDFIG modell med kontrollsystem.	41

## Tabelloversikt

Tabell 1: Data polpar kombinasjoner. Hentet fra [7], [9] og [10].	14
Tabell 2: Parametere fra motorfabrikant. (Lavhastighet og Høyhastighet).	32
Tabell 3: Observerte feilkoder.	39
Tabell 4: Fremdriftsplan i form av gantt skjema.	46

# 1. Innledning

## 1.1 Oppdragsgiver

Høgskulen på Vestlandet er en institusjon for høyere utdanning med fem studiesteder – Bergen, Førde, Haugesund, Sogndal og Stord. Skolen består av fire fakulteter: Fakultet for helse- og sosialfag (FHS), Fakultet for lærerutdanning, kultur og idrett (FLKI), Fakultet for økonomi- og samfunnsvitenskap (FØS) og Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap (FIN).

Etter søknadsprosessen som ble gjennomført høsten 2023 ble vi tildelt oppgaven i fra FIN ved Høgskulen på Vestlandet med Lasse Hugo Sivertsen som veileder. Oppdragsgiver ønsket at vi skulle se nærmere på Brushless Doubly Fed Induction Machine (BDFIM) med hensikt til generatordrift.

## 1.2 Problemstilling

Doubly Fed Induction Generator (DFIG) er ettertraktet som generator i vindturbiner, fordi den tillater effektiv produksjon under variable vindhastigheter. DFIG har børster og sleperinger som avhengig av børstegrad og turtall trenger utskifting flere ganger i året. Børstene og sleperingene kan få redusert levetid eller bli skadet av forurensninger slik som støv, sand og vann. For å sikre lengst mulig levetid, bør børster og sleperinger rengjøres og kontrolleres. Gjennom levetiden til DFIG kan vedlikeholdskostnadene bli dobbelt så mye som kostnaden til DFIG.

I denne oppgaven skal vi utforske forbedringspotensialet til generatordrift i virksomheter hvor det oppstår variable turtall, eksempelvis vindkraft og vannkraft. Vi skal se på Brushless Doubly Fed Induction Generator (BDFIG) som et alternativ til DFIG. Vi skal lage og teste en lab-modell for å se hvilke fordeler/ulempes en slik generator har kontra DFIG.

Oppgaven har vi blitt tildelt av Lasse Hugo Sivertsen fra FIN ved Høgskulen på Vestlandet, campus Bergen.

## 2. Kravspesifikasjon

- **Teori**

Fokuset for denne oppgaven ligger i å utforske BDFIG. Den teoretiske tilnærmingen er rettet mot det maskintekniske aspektet, og hvordan maskinen konstrueres. Dette vil involvere maskinens oppbygning og en analyse av eksisterende forskning.

- **Anskaffelse av utstyr.**

Oppdragsgiver er ansvarlig for anskaffelse av utstyr.

- **Bygge modell på laboratoriet.**

Konstruere en praktisk modell av BDFIG på laboratoriet. Design og fremgangsmåte var avhengig av utstyret som var tilgjengelig på laboratoriet. Det var ønskelig å ta i bruk den ferdige modellen til laboratoriegjennomganger med kommende studenter.

- **Diskusjon.**

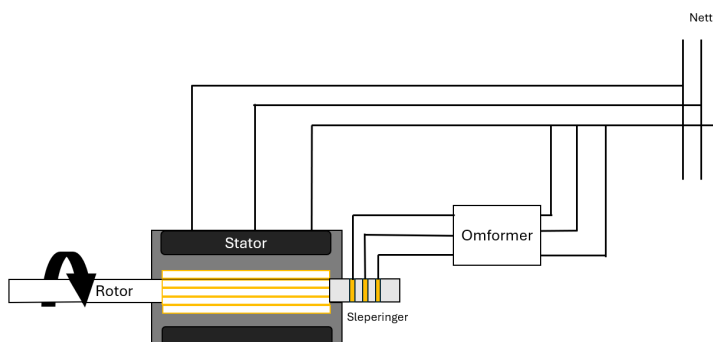
Oppgaven skal inneholde en grundig diskusjon. Her er målet å belyse fremgangsmåten for bygging av modell og drøfte resultatene. Diskusjonen vil utforske eventuelle implikasjoner av resultatene. Denne helhetlige tilnærmingen skal gi et solid fundament for å forstå BDFIG-teknologien både teoretisk og i praksis.



### 3. Litteraturgjennomgang

#### 3.1 Doubly Fed Induction Generator

I dag benyttes ofte DFIG for energiutvinning i systemer med variable hastigheter. Gitt at BDFIG og DFIG deler visse fundamentale egenskaper og designprinsipper, er det nyttig å forklare oppbygningen av DFIG før vi utforsker BDFIG. Dette legger et grunnlag for senere å kunne utføre en sammenligning av de to maskinene. Det er noen viktige forskjeller mellom disse to maskinene som vil detaljeres senere.



*Figur 1: DFIG skisse.*

##### 3.1.1 Hva er DFIG

DFIG er en induksjonsmaskin som brukes mye i vindturbiner og andre applikasjoner hvor det oppstår variable hastigheter i driften. Tradisjonelt har induksjonsmaskiner en fast hastighet som er avhengig av nettets frekvens og maskinens poltall. I motsetning til disse, vil en DFIG kunne operere ved variabel hastighetsdrift grunnet at den har to trefaseviklinger som opererer ved forskjellig strømfrekvens [1].

##### 3.1.2 Elektromagnetisk induksjon (Faradays lov)

Fenomenet elektromagnetisk induksjon beskriver hvordan elektrisk spenning induseres i en leder når den utsettes for et variabelt magnetfelt. Elektromagnetisk felt (EMF) induseres i en krets når den magnetiske fluksen ( $\Phi_B$ ) endres gjennom kretsen. Matematisk kan dette uttrykkes som:

$$\epsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

I generatoren skapes elektrisk energi ut i fra dette prinsippet. Rotoren (bevegelig del) inneholder permanente magneter eller elektromagneter. Når rotoren roteres, beveger magnetene seg i forhold til statorviklingene. Slik oppstår en tidsvarierende magnetisk flukstetthet gjennom statorviklingene. Endringen i flukstetthet gjennom statorviklingene over tid inducerer en EMF i disse viklingene. Indusert EMF vil drive en elektrisk strøm gjennom lasten/til nettet.

### **3.1.3 Rotor**

Rotoren i DFIG skiller seg fra konvensjonelle induksjonsgeneratorer ved at det tillater elektrisk kraft å bli overført til og fra rotoren. Dette medfører at DFIG kan operere ved variable hastigheter fra  $\pm 30\%$  av synkron turtall [2].

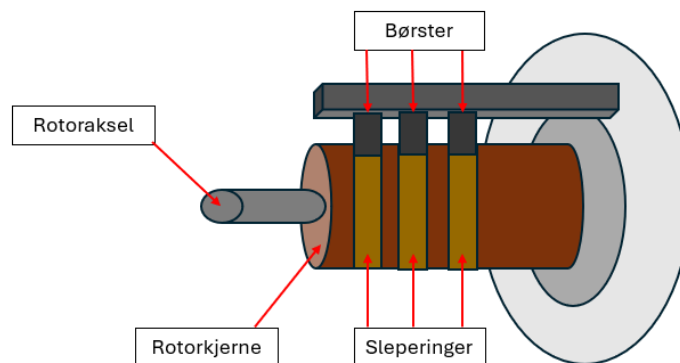
Rotor i en DFIG utstyres med et sett av viklinger som kobles til en ekstern krets via sleperinger og børster. Denne eksterne kretsene inneholder en variabel frekvensomformer hvor både amplitude og frekvens av strømmen som mates til rotor kontrolleres.

### **3.1.4 Børster og sleperinger**

Den variable hastighetsdriften i en DFIG oppnås ved rotoromformer som kobles til rotorkrets gjennom børster og sleperinger.

Børstene i en DFIG er elektriske ledende komponenter som overfører strøm til eller fra rotoren gjennom sleperinger. De lages vanligvis av grafitt, karbon eller en blanding av karbon og metall, for å sikre god ledningsevne og minimal slitasje både på børstene selv og sleperingene de kommer i kontakt med. Børstene tilhører den stasjonære delen av maskinen. Kraften børstene blir presset mot sleperingene er kritisk for pålitelig elektrisk kontakt og reduseringen av elektrisk støy. [3]

Sleperinger er elektrisk ledende ringer som er festet til rotorens aksling. De gir en fysisk og bevegelig forbindelse mellom maskinens stasjonære og roterende del. Når rotoren roterer vil børstene gli langs sleperingenes overflate, og det er ved denne kontakten at strøm flyter over fra roterende til stasjonær del. [3]

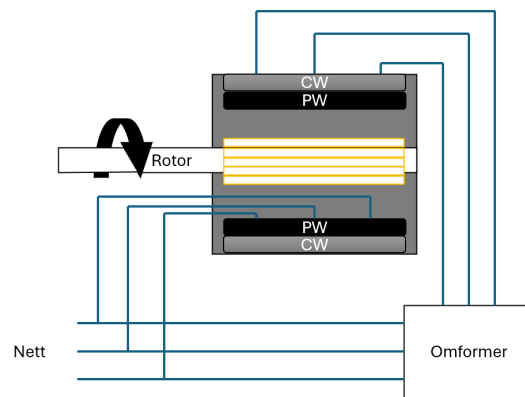


**Figur 2: Rotor med børster og sleperinger.**

Den fysiske kontakten mellom børster og sleperinger medfører slitasje over tid, som krever inspeksjon og vedlikehold. Ny teknologi som utforsker børsteløse maskiner, vil kunne redusere vedlikeholdsbehovet og forbedre systemets pålitelighet. [4]

## 3.2 BDFIG

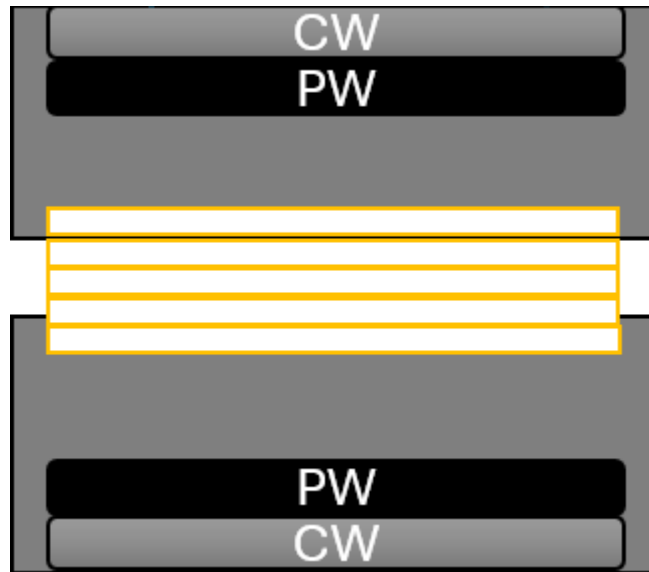
BDFIG utforskes som et alternativ til DFIG, da BDFIG regnes som mer pålitelig siden den ikke har børster og sleperinger. BDFIG har også fordelen at den kan driftes av omformer med brøkdel av maskinytelse. Typisk er denne verdien på 33% [5].



*Figur 3: BDFIG skisse.*

### 3.2.1 Stator

BDFIG skiller seg fra DFIG ved at den benytter to separate statorviklinger i stedet for børster, se figur 3. Statorviklingene deles inn i Kraft vikling (PW) og kontroll vikling (CW). PW kobles direkte til nettet, mens CW kobles til nettet via en omformer. Det er viktig å merke at effektflyten kan gå inn i CW eller ut fra CW, avhengig av om det er sub- eller supersynkron drift. PW og CW er isolert fra hverandre, og PW er nærmest luftgapet for å redusere lekkasje induktansen. [6].



*Figur 4: PW ligger nærmest luftgapet.*

### Ofte brukt polpar kombinasjoner

Ulike kombinasjoner av  $(p_{pw}/p_{cw})$  gir BDFIG forskjellig ytelse og karakteristikk.  $(p_{pw}/p_{cw}) = 2/3$ ,  $(p_{pw}/p_{cw}) = 2/4$  og  $(p_{pw}/p_{cw}) = 4/6$  er de mest brukte polpar kombinasjonene.

Kombinasjonen  $(p_{pw}/p_{cw}) = 2/3$  fører til høy effektivitet og effekttetthet, liten moment rippel og lav harmonisk forvrengning [7].  $(p_{pw}/p_{cw}) = 2/3$  skaper UMP (unbalanced magnetic pull) se 3.2.2. Dette fører til uønsket støy, og kan føre til skade på BDFIG. [6].

$(p_{pw}/p_{cw}) = 2/4$  har mindre effektivitet og derfor mindre effekttetthet sammenlignet med  $(p_{pw}/p_{cw}) = 2/3$ , men UMP problematikken er eliminert.  $(p_{pw}/p_{cw}) = 2/4$  fører til betydelig større harmonisk forvrengning og moment rippel sammenlignet med  $(p_{pw}/p_{cw}) = 2/3$ , noe som gjør den mindre attraktiv. [6].

$(p_{pw}/p_{cw}) = 4/6$  har lavest effektivitet og effekttetthet av disse polpar kombinasjonene, men har fordelen med lav harmonisk forvrengning og lav moment rippel. Her er også problematikken med UMP eliminert.[6] [7].

UMP er skadelig for maskiner i alle størrelser, men i [8] forventes det at i liten skala (D180) vil UMP være mindre skadelig for BDFIG. I megawatt skala vil kreftene som forårsakes av

UMP utgjøre en betydelig risiko for BDFIG, og en bør designe for å forhindre UMP. I [9] ble en 3.2 MW BDFIG vurdert, der ble  $(p_{pw}/p_{cw}) = 4/6$  valgt over  $(p_{pw}/p_{cw}) = 2/3$  på grunn av risikoen UMP utgjør ovenfor BDFIG i denne skalaen.

Under er en tabell som viser forventede verdier for ulike polpar kombinasjoner i D180 rammen.

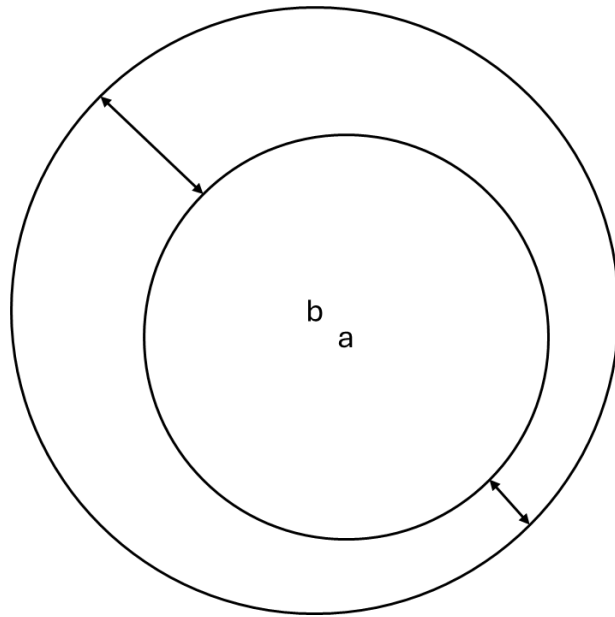
	Polpar kombinasjoner		
	2/3	2/4	4/6
THD PW	4,50 %	7,90 %	NA
THD CW	14,20 %	45,20 %	NA
Momentrippel (% av Tn)	9,80 %	38,30 %	NA
Virkningsgrad	72,5-77,5%	62,5-75%	60-62,5%

*Tabell 1: Data polpar kombinasjoner. Hentet fra [7], [9] og [10].*

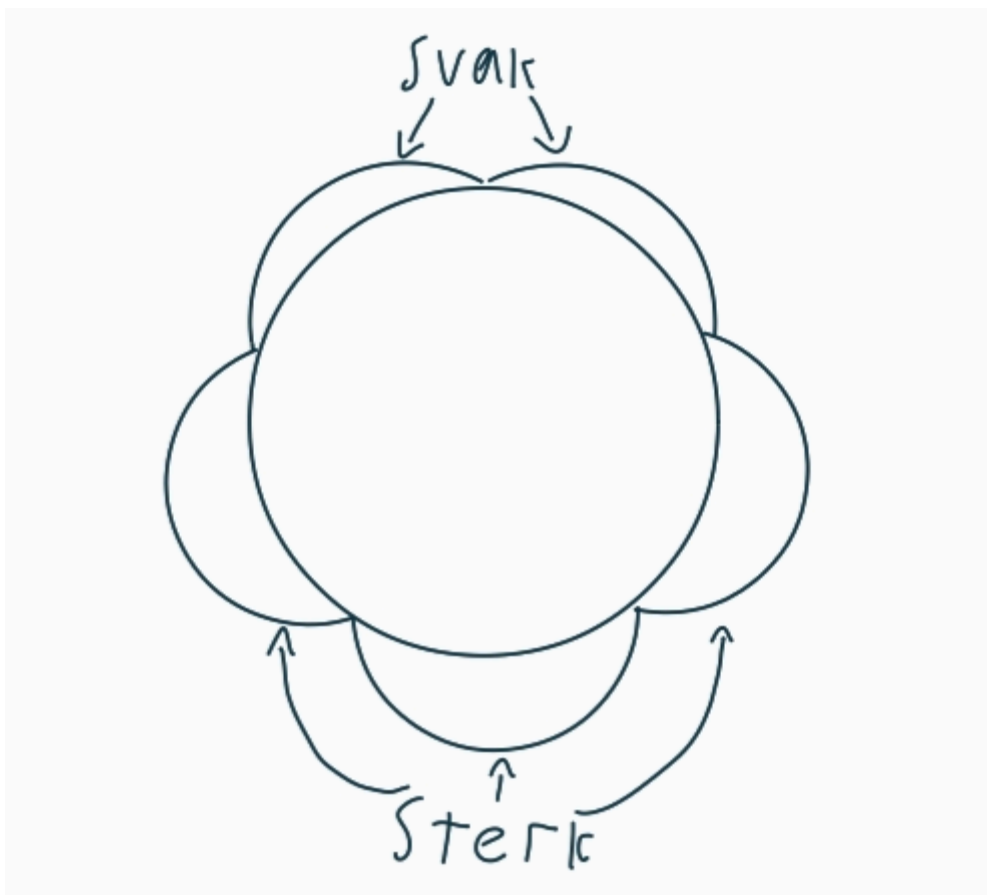
På grunn av at dette er små skala maskiner, så forventes det at virkningsgraden er betydelig dårligere enn samme polpar kombinasjon i stor skala. I [9] ble det konkludert at  $(p_{pw}/p_{cw}) = 4/6$  kan optimaliseres til en virkningsgrad på ca 96%. Vi fant ikke finne konkrete tall på momentrippel og THD for  $(p_{pw}/p_{cw}) = 4/6$ , men det forventes at THD og momentrippel er mindre for  $(p_{pw}/p_{cw}) = 4/6$  enn  $(p_{pw}/p_{cw}) = 2/4$ .

### 3.2.2 UMP

Ump oppstår når det er forskjell i flukstettheten i luftgapet mellom stator og rotor [11]. Forskjellen i flukstetthet forårsakes av at rotoraksling ikke er i senter av stator, og det er derfor forskjell i luftgapet [12] se figur 5. Det er ikke mulig i praksis å produsere en maskin hvor rotor er perfekt i senter av stator. UMP som forårsakes av dette vil derfor være uunngåelig. Forskjell i flukstetthet oppstår også hvis differansen mellom  $p_{pw}$  og  $p_{cw}$  er 1, se figur 6. Hvis differansen er  $(p_{pw} - p_{cw}) = 1$ , vil det være ulike antall sterke og svake flux soner [13]. Hvis differansen  $(p_{pw} - p_{cw})$  er større enn 1 vil det være likt antall sterke og svake flux soner, og polparene bidrar ikke til UMP.



*Figur 5: Senter av rotor (a) er ikke i senter av stator (b).*



*Figur 6: Fluktetthet ved UMP. Tilpasset fra [6].*

UMP fører til eksentrisk rotor bevegelse og derfor lyd og vibrasjoner. Den eksentriske bevegelsen kan føre til kontakt mellom stator og rotor. UMP bør derfor minimeres for å forhindre skade på maskinen.

### **3.2.3 Rotor**

Rotoren spiller en sentral rolle i omformingsprosessen av mekanisk energi til elektrisk energi. I motsetning til konvensjonelle induksjonsgeneratorer, har BDFIG-rotoren ingen direkte elektrisk forbindelse med det eksterne nett. Rotoren inneholder stavviklinger eller avanserte viklingssystem som Nested Loop (NL) og Nested Loop + Cage (cage+NL) [14].

#### **Energiomforming**

Energiomforming fra mekanisk til elektrisk energi skjer gjennom rotorens viklingssystem. Den relative bevegelsen mellom rotor og det roterende magnetfeltet fra statorviklingene (PW og CW), inducerer en EMF i rotorviklingene gjennom elektromagnetisk induksjon. Strømmene som genereres i rotorviklingene gjennom EMF-en, skaper et sekundært magnetfelt som interagerer med det roterende magnetfeltet fra statorviklingene. Interaksjonen mellom disse magnetfeltene produserer en kraft som virker på rotoren. Dette skaper elektrisk energi som hentes ut fra statorviklingene.

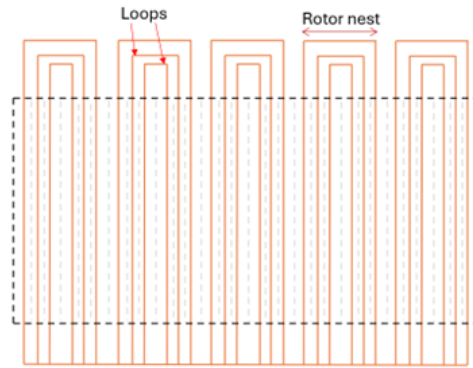
#### **Rotorkonfigurasjon**

Rotorkonfigurasjon NL og cage+NL anses som best egnet til drift av BDFIG [6]. Disse rotortypene tilbyr robuste konstruksjoner med bedre dreiemomentytelse, lavere tap og flux lekkasjer, sammenlignet med viklede rotorrotorer [6] [14]. NL og cage+NL har lignende fordeler overfor andre rotorkonfigurasjoner, men av disse to så er NL er den som oftest blir tatt i bruk [14].

- Nested Loop

NL er bygd opp av to sett viklinger som «nøstes» innenfor hverandre i rotoren, slik at de skaper et magnetfelt. Designet bidrar til å minimere elektromagnetiske tap ved å optimalisere fluks distribusjonen i rotoren.





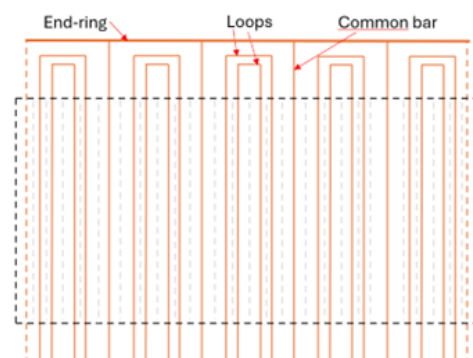
**Figur 7: Nested loop arrangement-skisse. Tilpasset fra [6].**

Rotor slots ( $N_{rnl}$ ) er sporene i rotor hvor viklingene plasseres. For Nested loop kan antall av disse kalkuleres ved formel (2), hvor  $q_r$  er antall loops (løkker) i nest. [14].

$$N_{rnl} = 2q_r(p_{pw} + p_{cw}) \quad (2)$$

- Nested Loop + Cage

Rotorutformingen cage+NL kombinere NL teknologien med en tradisjonell Squirrel Cage (SC) rotor med hensikt om å utnytte fordelene fra begge system. SC utforming karakteriseres med aluminium- eller kobberstenger som plasseres rundt rotoren, og er koblet med kortslutningsringer i enden som danner en kortsluttet krets [15]. SC forbedrer startegenskapene og gir en dempingseffekt under drift [15]. Kombinasjonen av SC og NL, som sammen danner cage+NL, resulterer i en rotorkonfigurasjon som er godt tilpasset for bruk i applikasjoner som krever variabel hastighet.



**Figur 8: Nested loop + cage arrangement skisse. Tilpasset fra [6].**

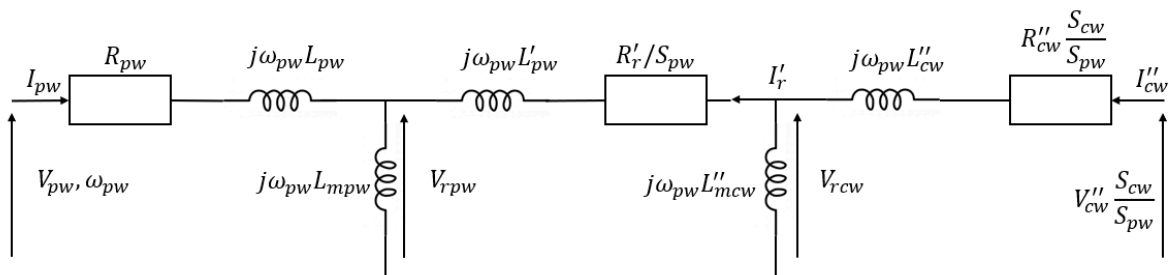
Rotor slots ( $N_{rnl}$ ) til cage+NL kan kalkuleres ved formel (3). [14].

$$N_{rnl} = (p_{pw} + p_{cw})(2q_r - 1) \quad (3)$$

Fra artikkel [14] ble det funnet at cage+NL hadde følgende fordeler overfor Nested loop:

- Cage+NL-rotoren tilbyr lignende fordeler som NL-rotoren, men foretrekkes for sine lavere impedanser, noe som tyder på bedre ytelse, spesielt når forskjellen mellom PW og CW polpar er større.
- Retningslinjer for sløyfedesign foreslår at sløyfer med avstander nærmere stigningen til det høyere poltallet i BDFIG er mer effektive i produksjonen av dreiemoment.
- Økning av sløyfer med brede avstander kan redusere den totale harmoniske forvrengningen i BDFIG, og dermed forbedre ytelsen.

### 3.2.4 Ekvivalentkrets



**Figur 9: Per-fase Ekvivalentskjema BDFIM.**

Figur 9 er ekvivalenten som brukes på BDFIG [15]. Denne ekvivalenten er gyldig i de fleste drifter, men den tar ikke med jerntap og harmonisk forvrengning. Når BDFIG driftes i synchronous operation mode og har DC magnetisert CW, bryter denne ekvivalenten sammen. CW vil da ha 0 i frekvens og dermed uendelig stor slip, motstanden i CW delen av ekvivalenten går dermed mot uendelig. [16] Foreslår en ny ekvivalent som er gyldig i alle drifter.

### 3.2.5 Driftsmoduser

BDFIG er mulig å drifte i både synkron- og asynkron modus. Synkron- og asynkron modus refererer til hvordan hastigheten til den roterende delen av maskinen relaterer til frekvensen fra nettet.

#### Asynkron drift

Ved asynkron modus, også kjent som induksjon modus, vil maskinen operere med en hastighet som er forskjellig fra den synkrone hastigheten. Dette skyldes slip, som er forskjellen mellom rotorens hastighet og statorens magnetisk felt hastighet. Ved asynkron drift kan BDFIG operere i Simple Induction Mode (SIM) og Cascade Induction Mode (CIM) [17]. Driftsmodusene er ikke ønsket til bruk av generator med variabel hastighet, men tas i bruk til eksperimentelle målinger for å evaluere rotorkonstruksjon [17].

- Simple Induction Mode

BDFIG kan brukes som induksjon maskin når kun PW er tilkoblet, mens CW har åpen krets, med  $p_{pw}$ . Dette kan også oppnås når CW er tilkoblet og PW har åpen krets, med  $p_{cw}$ . [17]

- Cascade Induction Mode

Når BDFIG opereres i CIM kortsluttes PW, og CW mates med variabel frekvens for å regulere hastigheten.

#### Synkron drift

Synkron modus vil si at en elektrisk maskin opererer ved en hastighet som er direkte proporsjonal med nettets frekvens. BDFIG opererer optimalt rundt  $\pm 30\%$  synkronturtall. Turtall og elektrisk frekvens som sikrer synkron drift finnes ved formel 4.  $\omega_r$  er rotorens mekaniske rotasjonshastighet,  $\omega_{pw}$  og  $\omega_{cw}$  er elektrisk frekvens for PW og CW.  $p_{pw}$  og  $p_{cw}$  er polpar tallet til PW og CW.

$$\omega_r = \frac{(\omega_{pw} + \omega_{cw})}{(p_{pw} + p_{cw})} \quad (4)$$

- Synchronous Operation Mode

Driftsmodusen som vekker mest interesse for drift av BDFIG, er synchronous operation mode. Ved denne modusen deler de to statorviklingene CW og PW en rotorstrøm med samme frekvens. Frekvensen til CW må justeres gjennom frekvensomformer for hver rotorhastighet. Dette gjøres for å opprettholde synkroniseringen mellom rotoren og det magnetiske feltet som genereres av statorviklingene. Uten justering av kontrollviklingenes frekvens til rotorhastigheten, vil maskinen oppleve ujevn drift. Dette kommer fra dreiemomentpulsasjoner som oppstår når den ikke er synkronisert. Dreiemomentpulsasjoner kan føre til mekanisk stress på systemet, uønskede vibrasjoner og støy. [4]

Driftsmodusen er avhengig av at CW og PW induserer lik rotorfrekvens, uttrykt med formlene nedenfor.

$$\omega_{rpw} = \omega_{rcw} \quad (5)$$

Hvor  $\omega_{pw} = \omega_{rpw} + p_{pw} \omega_r$  og  $\omega_{cw} = -\omega_{rcw} + p_{cw} \omega_r$  (6)

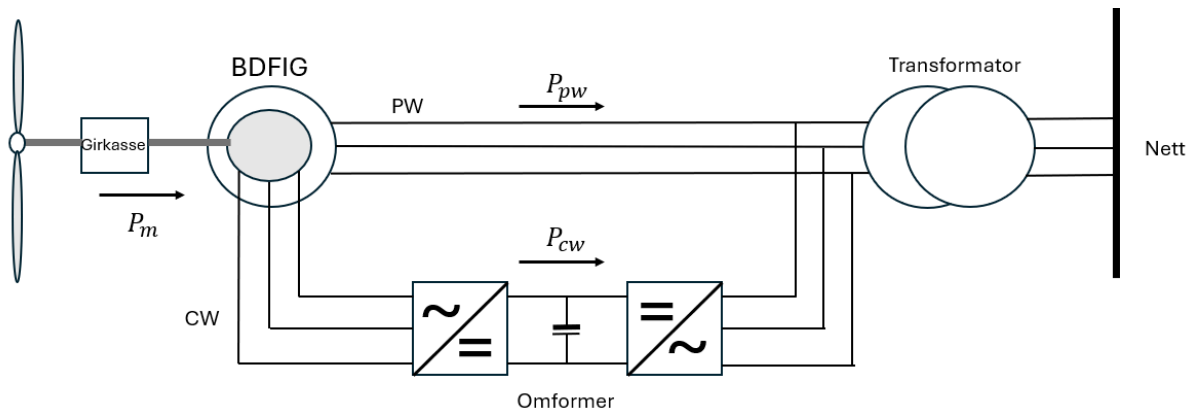
$\omega_{rpw}$  og  $\omega_{rcw}$  er de induserte rotorfrekvensene for PW og CW.  $\omega_{pw}$  og  $\omega_{cw}$  er frekvensene til PW og CW i stator.  $\omega_r$  er rotorens mekaniske hastighet. Synchronous operation mode er garantert når frekvensen  $\omega_{cw}$  oppfyller formel 7. [4]

$$\omega_{cw} = (p_{cw} + p_{pw})\omega_r - \omega_{pw} \quad (7)$$

### 3.2.6 Sub- og supersynkron drift

Den varierte hastighets kapasiteten til BDFIG skyldes dens fleksibilitet til å fungere effektivt både under forhold der hastigheten er lavere (subsynkron) og høyere (supersynkron) enn synkron hastighet.

- Supersynkron modus



*Figur 10: Supersynkron drift, effektflyt.*

Supersynkron modus er en tilstand hvor BDFIG opererer med høyere rotasjonshastighet enn maskinens synkron hastighet. Den synkron hastigheten avhenger av nettets frekvens og antall poler i generator. For eksempel, en tradisjonell generator med 4 poler koblet til 50Hz nett, vil ha en synkronhastighet lik 1500rpm. Synkronhastighet beregnes med formel 8. [17]

$$n_s = \frac{60 \times f}{P} \quad (8)$$

$n_s$  – Synkront Turtall

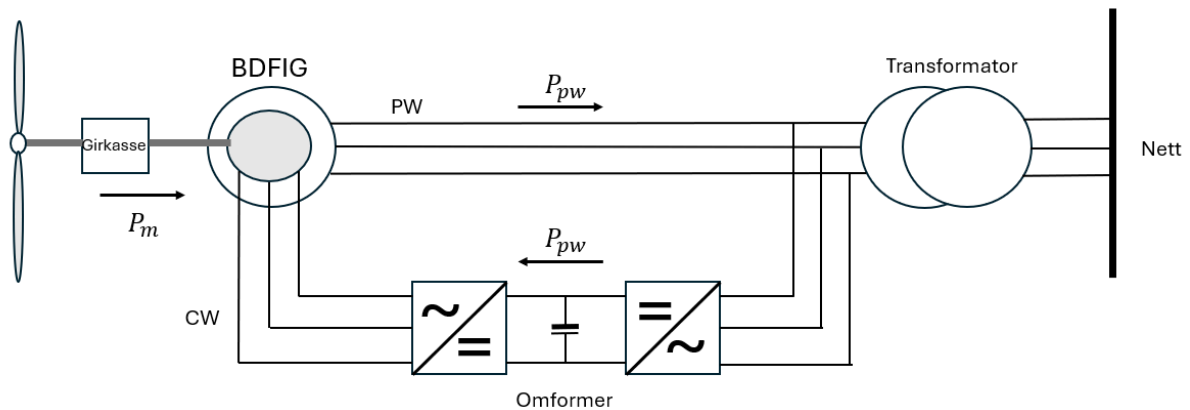
f – Nettets frekvens

P – Polpar

CW kan motta eller levere strøm via frekvensomformer. Omformerer fungerer som en bro mellom CW og nettet. Ved supersynkron drift genereres overskuddsenergi som CW-omformer koblingen behandler. Den konverterer frekvensen og fasen av den genererte energien fra CW slik at den matcher nettets frekvens og fase. Det tillater energioverføring fra

CW til nettet. Gjennom den prosessen blir mekanisk overskuddsenergi gjort om til brukbar elektrisk energi. [18, 19]

- Subsynchron modus



*Figur 11: Subsynchron drift, effektflyt.*

Ved subsynchron modus opererer generatoren med en hastighet som er lavere enn synkronturtall. I denne modusen absorberer CW kraft fra nettet via omformerer. Omformerer justerer frekvensen og fasen til CW for å sikre effektiv drift. Supplementeringen til CW er nødvendig for at energien fra PW til nett, overføres ved riktig frekvens. Mesteparten av kraften går gjennom statorvikling og ut til nettet uten å bli behandlet av omformerer. En mindre andel, som tilsvarer slip-effekt, håndteres av omformerer slik at det elektromagnetiske feltet som er nødvendig for å generere elektrisitet opprettholdes. Dette medfører at BDFIG evner å gjenvinne den tapte kraften fra slip. [18, 19].

### 3.2.7 Tap i BDFIG

Når man tester et BDFIG-system, er det viktig å observere effektflyt og indre tap. Beregning av kjernetap i en induksjonsmaskin kan være utfordrende på grunn av ujevn fordeling av flukstetthet i kjernen. I en BDFIG er kjernetapene høyere og mer komplekse enn i en konvensjonell induksjonsmaskin av flere grunner. For det første finnes det to roterende statorfelt med ulike hastigheter, og for det andre genererer rotorviklingen et høyt nivå av harmonisk forvrengning (THD). [20]

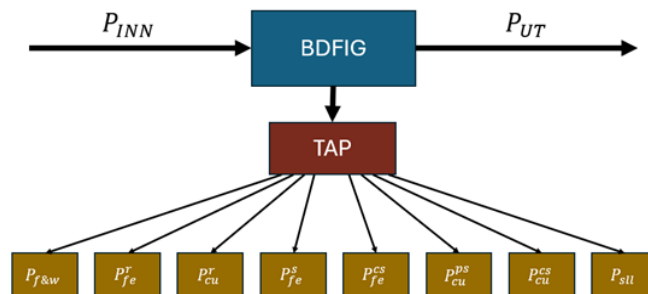
Kjernetapene i en BDFIG kan separeres inn i 4 komponenter.

$P_{fe}^{ps}$  - Stator jerntap grunnet PW felt.

$P_{fe}^{cs}$  - Stator jerntap grunnet CW felt.

$P_{fe}^{pr}$  - Rotor jerntap grunnet PW felt.

$P_{fe}^{cr}$  - Rotor jerntap grunnet CW felt.



**Figur 12: Tap i BDFIG.**

Effektflyt diagrammet ovenfor viser alle effekttap man tar høyde for i en BDFIG. I tillegg til kjernetapene som ble nevnt tidligere, kan følgende tap observeres:

$P_{f\&w}$  - friksjon- og viftetap

$P_{fe}^r$  - Rotor jerntap

$P_{cu}^r$  - Rotor kobbertap

$P_{sll}$  - Belastningsbetingede tap (*stray load loss*)

Effekttapene i en BDFIG kan bestemmes gjennom laboratorieanalyser ved å utføre tester som DC-test, blocked rotor-test og No-load-test. Studien [20] beskriver i detalj hvordan disse tapene måles og beregnes.

### **3.3 Sammenligning**

DFIG brukes som en variabel hastighets generator, og bruker børster og sleperinger for å koble omformer til rotor. Ved å regulere på frekvens og amplitude på strøm, er det mulig å generere elektrisk energi ved turtall som avviker fra synkront turtall med 30%. Børstene og sleperingene er vedlikeholds krevende, men fører samtidig til en simplere konstruksjon.

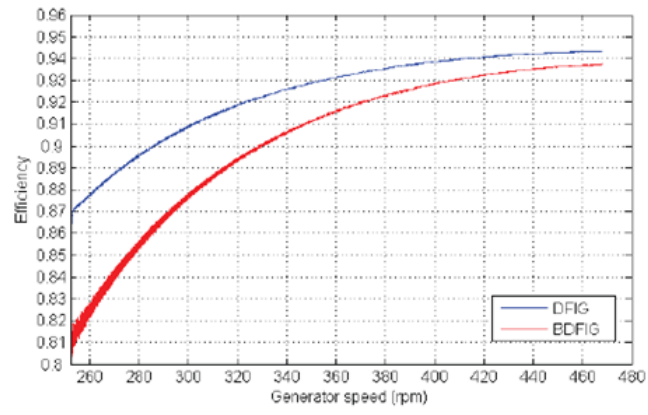
BDFIG kan også brukes som variabel hastighets generator. Men BDFIG bruker to adskilte statorviklinger istedenfor børster og sleperinger. Ved å regulere på frekvensen på CW er det mulig også mulig å generere elektrisk energi ved turtall som avviker med 30% fra synkront turtall. Ulemper ved bruk av BDFIG sammenlignet med DFIG, inkluderer høyere anskaffelseskostnad og lavere effektivitet. BDFIG har en mer kompleks konstruksjon på grunn av at det brukes to statorviklinger. Effektivitet og energiutbytte kan også påvirkes negativt, grunnet større kobbertap og økt magnetisk lekkasje[18].

Grunnet børsteløs utforming, vil BDFIG ha lavere vedlikeholdskostnader sammenlignet med DFIG, hvor jevnlig utbytting av børster og sleperinger må utføres [4].

#### **Studie med sammenligning av DFIG og BDFIG, 75KW**

Studien [4] sammenligner ytelsen til DFIG og BDFIG systemer, hver på 75KW. Studien konkluderer med at BDFIG er en realiserbar erstatning til DFIG. Under testing ble det gjennomført målinger av reaktiv effekt, tilsynelatende effekt, aktiv effekt og RMS strøm. Målingene viser at systemene oppfører seg ganske likt i PW, CW og nett. Testene ble utført over et turtallsområde fra 252rpm (subsynkron drift), til 468rpm (supersynkron drift), med naturlig synkron hastighet 360rpm. Studien avdekker at BDFIG-ens største svakhet er dens virkningsgrad, som viser seg å være betydelig svakere enn DFIG under subsynkron drift. Dette er tydelig illustrert i grafen hentet fra artikkelen.[4]





**Figur 13: Måling av virkningsgrad. Hentet fra [4].**

## 4. Utstyr til lab-modell

### 4.1 Generatoren

Til lab-modell ble 2-hastighetsmotor Lønne 1TZ9 C 112M 6/4pole 0,9/3KW 400V 50Hz B3 brukt som generator i vårt BDFIG-system. Generatoren har dobbelt vikling sett med Y/Y kobling. Den doble hastighetsfunksjonen tilbyr en lav effekt på CW ved 0,9 kW med en hastighet på 975 rpm, og en høy effekt på PW ved 3 kW med en hastighet på 1455 rpm. Denne kapasiteten muliggjør en justering av driftsparametere for å matche de variable lastforholdene som oppstår i BDFIG-applikasjoner.

Vi har ikke åpnet maskinen og bekreftet rotorkonfigurasjon, men det antas at det er cage+NL.



*Figur 14: Lønne-Motor.*

V		Hz	A	kW	cosφ	NOM.EFF	1/min	IE-CL	CL
400	Y	50	3.05	0.9	0.66	64.7	975		CL
400	Y	50	6.8	3.0	0.78	81.4	1455		

**LÖNNE** Made in Czech Rep. 1TZ90121BQ234AA4-Z | UD 2303/9043176-010-001  
IEC/EN 60034 112M IMB3 IP55  
31kg Th.Cl. 155(F) -20 °C ≤TAMB≤40 °C  
Bearing DE 6306-2ZC3 NE 6306-2ZC3  
www.lonne.com

*Figur 15: Merkeskilt til maskin.*

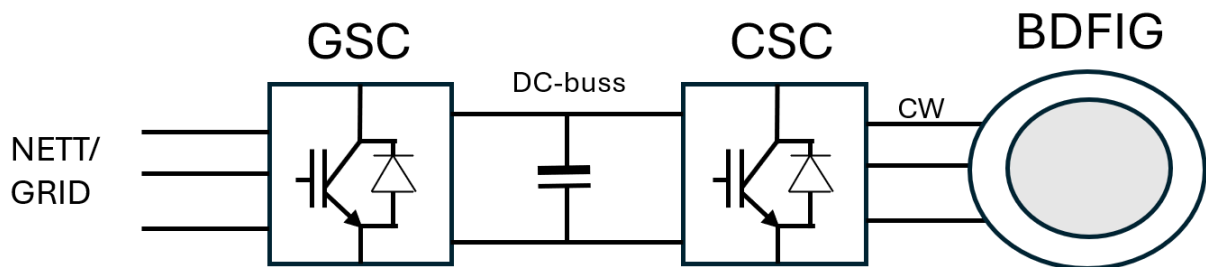
## 4.2 Frekvensomformer

Omformer vi tar i bruk er ACS880-11-12A6-3, hvor merkeskilt kan leses i figur 17.

Omformeren som blir brukt i et BDFIG system skaleres ut ifra generatorens slip.

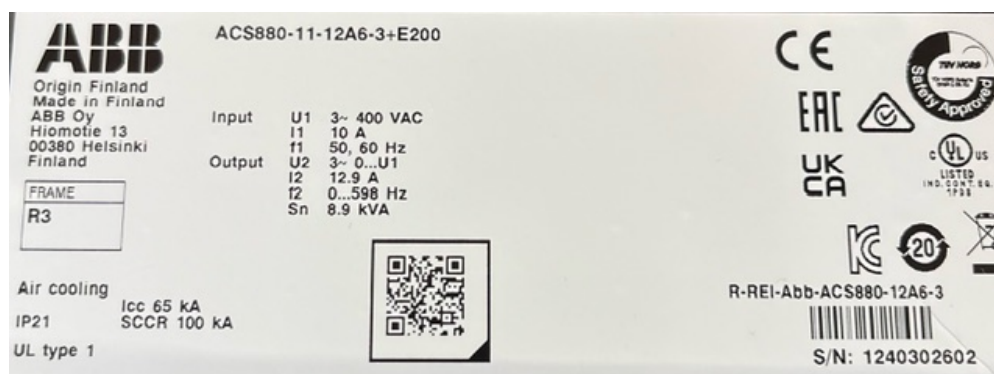
BDFIG-modellen krever at man tar i bruk «Bi-directional static power converter»

(toveiskonverter) grunnet dens evne til å konvertere energi i begge retninger.



Figur 16: Omformer

«Toveiskonverter» består av to stk. Voltage Source Inverter (VSI) koblet sammen gjennom en DC-buss, Grid Side Converter(GSC) som er koblet til nett og Control Side Converter (CSC) koblet til CW stator. Omformeren konverterer AC-DC-AC fra nett til den ønskede frekvensen som trengs av generator for å opprettholde nettfrekvens. Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT) brukes i omformeren for høyhastighet switching og robuste strømhåndtering. I tillegg er en fly-back diode (freewheeling diode) koblet på tvers av hver IGBT for å gi en strømbane når IGBTene er av. Dette er en avgjørende funksjon for å muliggjøre toveis energiflyt, som gjør det mulig for generatoren å enten absorbere eller levere effekt til nettet. [21]

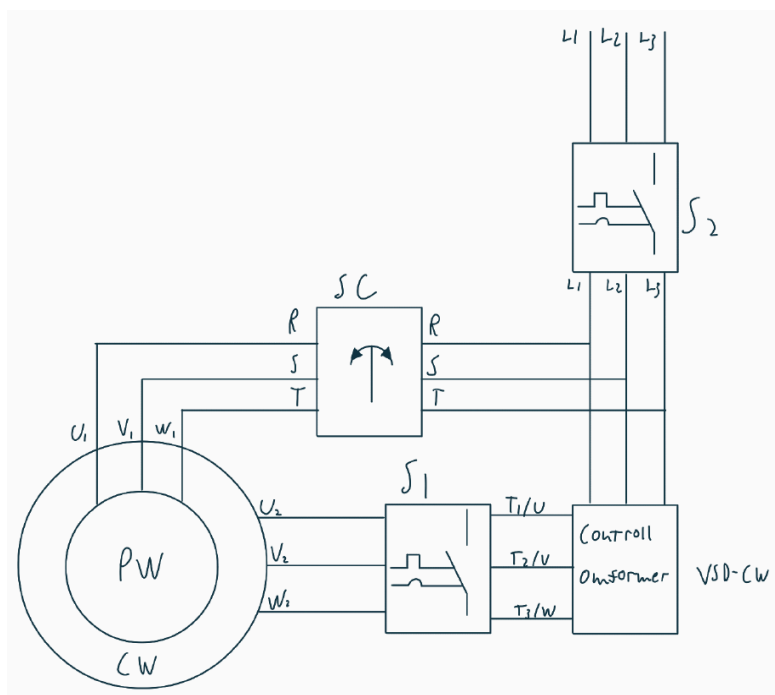


Figur 17: Frekvensomformer merkeskilt.

### 4.3 Lab-modell

I lab-modellen benytter vi sikringer ( $S_1$  og  $S_2$ ) mellom BDFIG og nett, samt mellom VSD-CW og CW. Vi bruker disse sikringene for å opprettholde sikkerhet. Synkronoskopet (SC) bruker vi for å sikre at PW og nett har rett fasefølge og er synkroner.

BDFIG lab-modellens koblingsskjema kan ses nedenfor. Komplette lab-oppsett er oppdelt i to skjemaer, figur 18 og figur 19. Figur 18 viser BDFIG system og figur 19 viser drivmaskinsystemet. Skjema inneholder alle komponenter som er tatt med i det virkelige oppsettet på laben.



**Figur 18: Koblingsskjema BDFIG.**

Forkortelser figur 18:

$S_1$  – Sikring

$S_2$  – Sikring

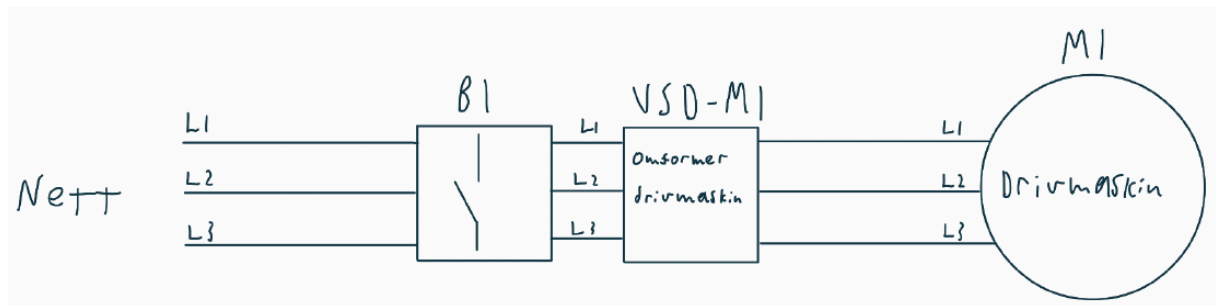
SC – Synkronoskop

VSD-CW – Frekvensomformer for CW

PW - Kraftvikling

CW - Kontrollvikling

Drivmaskin (M1) er en 7,5kW 400V Y-koblet 3-fase asynkronmotor med  $\cos\phi = 0,87$ . M1 er mekanisk koblet til BDFIGs rotor og fungerer som turbin i modellen. Drivmaskin styres ved egen frekvensomformer (VSD-M1) slik at pådrag på BDFIG rotor kan justeres, for å drifte BDFIG sub- og supersynkront. Bryter B1 brukes slik at vi har mulighet til å gjøre VSD-M1 spenningsløs for ekstra sikkerhet.



**Figur 19: Koblingsskjema drivmaskin.**

Forkortelser figur 19:

M1 - Drivmaskin

VSD-M1 - Frekvensomformer for drivmaskin

B1 - 3-fase bryter

## 5. Ytelses- og parameteresting

Til testing var det planlagt å gjennomføre tre sett med eksperimenter. Målet var først å gjennomføre en ytelsestest for å bestemme generatorens virkningsgrad ( $\eta$ ). Videre var det planlagt å gjøre parameterestimering for å identifisere maskinens elektriske parametere og sammenligne disse med verdiene oppgitt av produsenten. I tillegg, inspirert av en artikkel [4] der BDFIG og DFIG av samme størrelse ble sammenlignet, ønsket vi å utføre lignende tester.

### 5.1 Ytelse

Ytelsestester på BDFIG-modellen blir utført ved å observere dens atferd under varierte driftsforhold. Ved å foreta omfattende målinger mens modellen opererer i forskjellige moduser: subsynkron, supersynkron og ved naturlig synkron hastighet. Det er funnet at BDFIGs funksjonsområde for variabel hastighet strekker seg rundt  $\pm 30\%$  av den naturlig synkrone hastigheten. Naturlig synkron hastighet er gitt ved å sette  $\omega_{cw}$  til 0 i formel (4).

Dette gir oss  $\frac{2\pi(50+0)}{(2+3)} = 20\pi$ ,  $n_r = \frac{20\pi}{2\pi} * 60 = 600 \text{ rpm}$ . Dette fører til et operasjonelt hastighetsområde mellom 420 rpm og 780 rpm.

Til ytelsestest ønsker vi å utføre følgende målinger:

#### 1. RMS-strøm

- Måleområder: Kontrollvikling (CW), Kraftvikling (PW) og Nett

#### 2. Aktiv effekt

- Måleområder: CW, PW og Nett

#### 3. Reaktiv effekt

- Måleområder: CW, PW og Nett

#### 4. Tilsynelatende effekt

- Måleområder: CW, PW og Nett

#### 5. Total virkningsgrad

- Beregnes for å gi en helhetlig vurdering av modellens ytelse, basert på andre målinger.

Disse målingene gir en omfattende forståelse av BDFIG-modellens prestasjoner og effektivitet under et bredt spekter av driftsforhold. Dette vil ytterligere berike vår kunnskap om modellens operative karakteristikk.

Det er ønskelig å utføre samme type ytelsestester på en DFIG-modell for å sikre et robust grunnlag for sammenligning mellom de to maskintypene. Ytelsestestene vi gjennomfører er basert på en tidligere studie [4] som vi har omtalt tidligere, og denne vil tjene som en verdifull referanse for å sammenligne våre resultater mot.

Målinger vil bli gjennomført ved fire forskjellige punkter for å bestemme virkningsgraden til systemet ved disse punktene. Basert på formel(4) til å kalkulerte vi to av punktene til henholdsvis 420 rpm og 780 rpm. Videre vil vi utføre målinger ved to ytterligere punkter mellom disse for å gjøre sammenligninger.

For å beregne virkningsgraden finnes effekten ( $P_{inn}$ ), ved å lese av moment og turtall fra omformer til **M1** inn på BDFIG-rotor og effekten ut fra statorviklingene ( $P_{nett}$ ).

Virkningsgraden kan beregnes ved hjelp av formel 10.

Basert på tidligere studier [4], forventes det at virkningsgraden vil være noe lavere fra subsynkron drift til synkron drift, mens den fra synkron drift til super synkron drift vil være mer stabil.

$$P_{inn} = T \cdot \omega_{inn} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{P_{nett}}{P_{inn}} \quad (10)$$

## 5.2 Parameterestimering

Parameterestimering utføres for å fastslå de elektriske parameterne i motor. De spesifikke parameterne vi fokuserer på, er resistanser og induktanser assosiert med stator og rotor. For å fastslå disse verdiene blir det gjennomført tre tester, DC-Test, Låst rotor test og Tomgangstest test. Disse verdiene kan benyttes til å øke driftseffektiviteten ved å anvende dataene i beregninger og simuleringer. I vårt tilfelle er parameterestimering relevant fordi det muliggjør bruk av en ekvivalent krets modell.

Motorprodusenten Lønne har levert oss data for elektriske parametere som gjelder for både høy- og lavhastighets viklinger. Parametrene som er gitt i per unit-systemet, er relatert til den normale impedansen  $Z_n$ . For hver driftsmodus finnes det et dobbel sett med verdier: en for når slip ( $s$ ) er 1, det vil si når rotoren er i ro, og en annen for når rotor går med viklingenes asynkrone turtall (1455 o/min for høyhastighet og 975 o/min for lavhastighet). Disse verdiene er avledet fra parameterestimering. Vårt mål er nå å utføre en rekke tester for å validere disse verdiene ved å sammenligne våre resultater med testdata som fabrikanten har oppgitt.

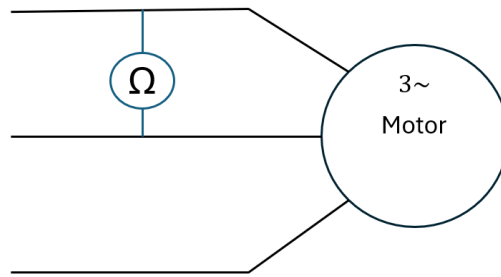
Lavhastighetsdrift parameter (975rpm, 0.9kW)				Høyhastighetsdrift parameter (1455rpm, 3.0kW)			
Resistans og reaktans per fase				Resistans og reaktans per fase			
Verdier (per unit) referert til	$Z_n$	$Z_n = 75.72\Omega$		Verdier (per unit) referert til	$Z_n$	$Z_n = 75.72\Omega$	
slip	$s$	0.03	1	slip	$s$	0.35	1
Stator-Resistans	$R_1 / Z_n$	0.1688	0.1688	Stator-Resistans	$R_1 / Z_n$	0.04014	0.04014
Stator-lekkasje reaktans	$X_{1\sigma} / Z_n$	0.2232	0.04319	Stator-lekkasje reaktans	$X_{1\sigma} / Z_n$	0.1532	0.0239
Rotor-resistans	$R_2' / Z_n$	0.03434	0.03645	Rotor-resistans	$R_2' / Z_n$	0.01387	0.01453
Rotor-lekkasje reaktans	$X_{2\sigma}' / Z_n$	0.06736	0.06603	Rotor-lekkasje reaktans	$X_{2\sigma}' / Z_n$	0.02232	0.02219
Magnetiserings-reaktans	$X_H / Z_n$	1.189	1.175	Magnetiserings-reaktans	$X_H / Z_n$	0.9245	0.9377
Jerntap-resistans	$R_p / Z_n$	11.03	11.03	Jerntap-resistans	$R_p / Z_n$	6.696	6.696

**Tabell 2: Parametere fra motorfabrikant. (Lavhastighet og Høyhastighet).**

### 5.2.1 DC-Test

For å fastsette DC-verdien av stator resistansen, benyttes et nøyaktig ohm-meter. Resistansen måles mellom to av fasene, og verdien  $R_1$  antas å være halvparten av den målte verdien når statorviklingen er koblet i stjernekobling. Måling utføres for CW og PW. [1]





**Figur 20: DC-Test måleoppsett**

### 5.2.2 Låst rotor test (Blocked rotor test)

Låst rotor-testen har en viktig rolle i å bestemme kritiske motor parametere som rotor resistans, lekkasje reaktans og egenskaper ved startmoment. I denne prosessen låses rotoren fysisk for å hindre rotasjon. Det er viktig at én statorvikling er i open-loop når den andre testes, noe som gjelder for begge viklingene. Deretter påføres en redusert spenning til statorviklingene, som holdes betydelig lavere enn normal driftsspenning. Mens rotoren er blokkert, måles strøm, spenning og effekt på stator. Disse målingene gir en indikasjon på forholdene maskinen opplever under oppstart. Viktige parametere som stator- og rotor resistans og -reaktans, samt startmoment og -strøm, beregnes fra målingene. Disse beregningene er basert på spenning og strøm med vurdering av elektromagnetiske felt, og testen gir nøyaktige estimater for å sikre motorens effektivitet og sikkerhet under oppstart. Måleoppsettet som anvendes for låst rotor-test er det samme som for no-load test, som vist i figur 21.

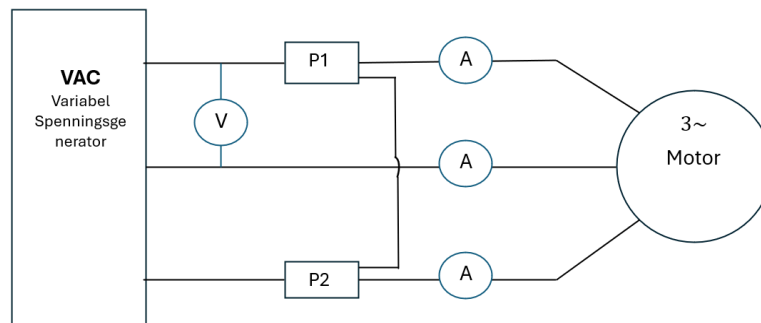
### 5.2.3 Tomgang test (No-load test)

Tomgangstest brukes for å bestemme ulike parametere og egenskaper til motoren uten at noen mekanisk belastning er påført. Dette medfører at sakking er tilnærmet lik 0,  $s \approx 0$ .

Tomgangstest innebærer at man forsyner statorviklingen i en trefase induksjonsmotor med dens nominelle spenning og frekvens. I tilfelle for BDFIG, forsynes statorvikling mens den andre viklingen er åpen. Instrumenter som amperemeter, voltmeter og wattmeter kobles til for å måle tomgangsstrømmen ( $I_o$ ), effektfaktoren ( $\cos\phi_o$ ), inngangseffekten ( $P_o$ ), stator

kobbertap ( $P_{wf}$ ) og kjernetap ( $P_i$ ), samt for å bestemme tomgangs motstanden ( $R_o$ ) og reaktansen ( $X_o$ ). Disse målingene gir innsikt i motorens magnetiseringskrav, kjernetap og effektivitet under tomgangsforhold.

Ved å gjennomføre denne testen, kan man utlede inngangseffekten ved null spenning, som tilsvarer friksjons- og viftetapene. Testen gjør det også mulig å separere tapene i to kategorier: tap som oppstår på grunn av motorens elektriske og magnetiske egenskaper (som kjernetap), og mekaniske tap som skyldes friksjon og luftmotstand i motoren. Disse dataene er grunnlaget for å forstå motorens ytelse under drift, og er avgjørende for vedlikehold og feilsøking.



**Figur 21: Blocked rotor test og No-load test måleoppsett**

$P1$  og  $P2$  – Wattmeter

V – Voltmeter

A – Amperemeter

På skissen er det brukt 2 stk Watt-meter. Ved å anvende *two wattmeter method* i en no load test, plasseres to wattmeter slik at de måler effekten i to av de tre fasene i en trefase forbindelse. Metoden baserer seg på at de to wattmeterne sammen gir en nøyaktig måling av den totale effekten i systemet. Dette oppnås ved at hvert wattmeter måler deler av den totale effekten fordelt på fasene. Summen av avlesningene fra de to wattmeterne gir den totale effekten som trekkes av motoren eller generatoren under testen. [22]

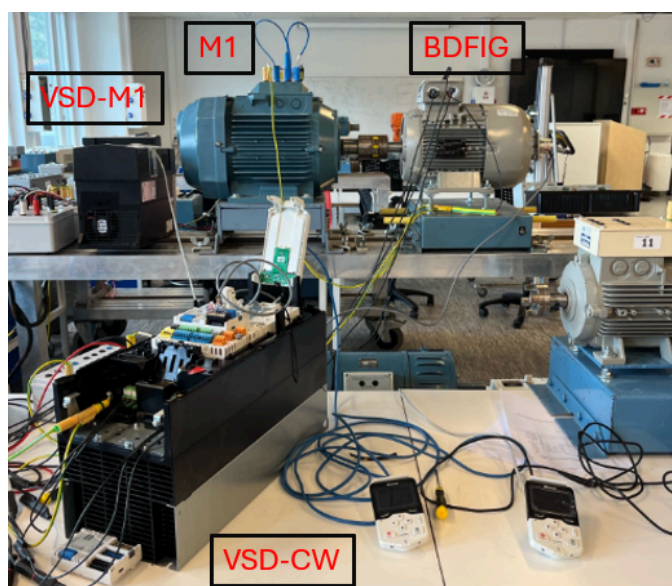
Denne informasjonen kan brukes til å beregne effektiviteten til motoren eller generatoren ved å sammenligne inngangs- og utgangseffekten.

## 6. Laboratoriearbeid

### 6.1 Praktisk utførelse

Vi opplevde noen forsinkelser med å få i gang laboratoriearbeidet, noe som begrenset omfanget av de planlagte målene. Vårt opprinnelige mål var å utføre parameterestimering, ytelsestesting og sammenligninger mellom BDFIG og DFIG. På grunn av den forsinkede oppstarten besluttet vi å konsentrere oss om ytelsestestene, med det endelige målet om å fastslå systemets virkningsgrad.

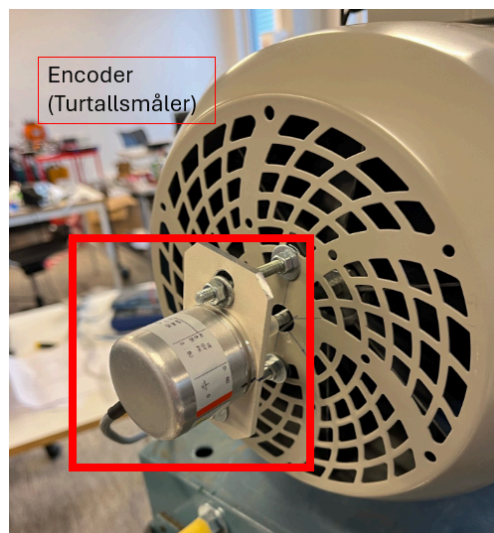
Laboratorie-modell nedenfor ble koblet i henhold til figur 18 og figur 19.



*Figur 22: Laboratorie oppsett.*

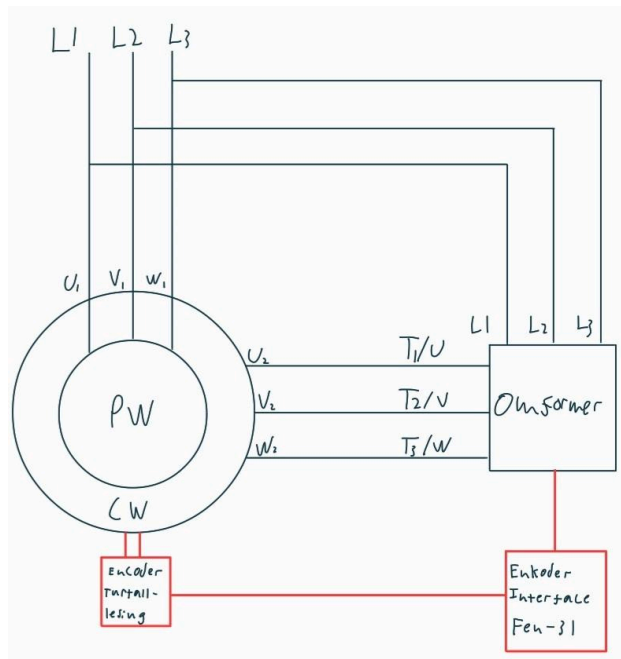
Vi ønsket å kjøre en ID run for å verifisere at omformer kunne lage en modell av CW. En motor ID run gjør at omformer kan bygge en nøyaktig modell av motoren i sitt minne. Denne modellen benyttes for å beregne og kontrollere motorens dreiemoment og hastighet basert på dens faktiske egenskaper. Avhengig av hvilken styremetode man velger, så utføres ID run med Direct Torque Control (DTC) eller Scalar. DTC styrer direkte og dynamisk dreiemoment og flux i en motor ved å raskt velge optimal spenning, mens Scalar Control (V/f Control) justerer motorhastighet ved å holde et konstant forhold mellom spenning og frekvens.

Det ble forsøkt å kjøre en ID run på CW ved bruk av omformen som mislykkes, både ved bruk av styremetoder DTC og Scalar. Vi forsøkte også med “reduced” ID run, men med samme resultat. Planen ble derfor å ta i bruk turtallsstyring for omformer til CW, slik at vi kunne sette et ønsket turtall og omformer ville regulere basert på dette turtallet. Ved første testkjøring av CW-omformer viste det seg at omformeren ikke klarte å kalkulere riktig turtall ved generator drift. Når drivmaskin kjørte ved 400 rpm, så leste vi av -250 rpm fra CW-omformer. Det ble derfor nødvendig å ta i bruk turtallsmåler for å lese av turtallet direkte, og sende dette til omformer via digital signalinngang. Til dette benyttet vi enkoder av typen 8.KIS40.1342.2048 og HTL encoder-interface FEN-31.



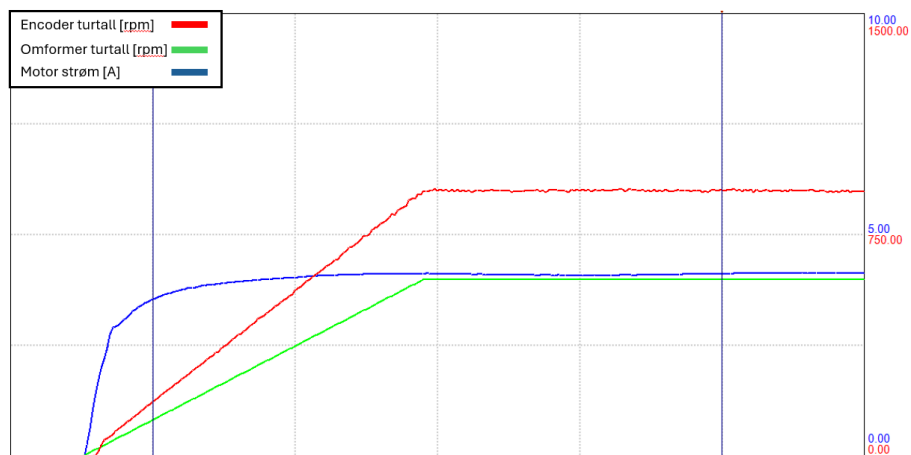
*Figur 23: Turtallsmåler montert på BDFIG aksling.*

Endring i koblingskjema etter Encoder ble installert kan ses på figur 24, hvor encoder er markert i rødt.



**Figur 24: Kablingsskjema med turtallsmåling.**

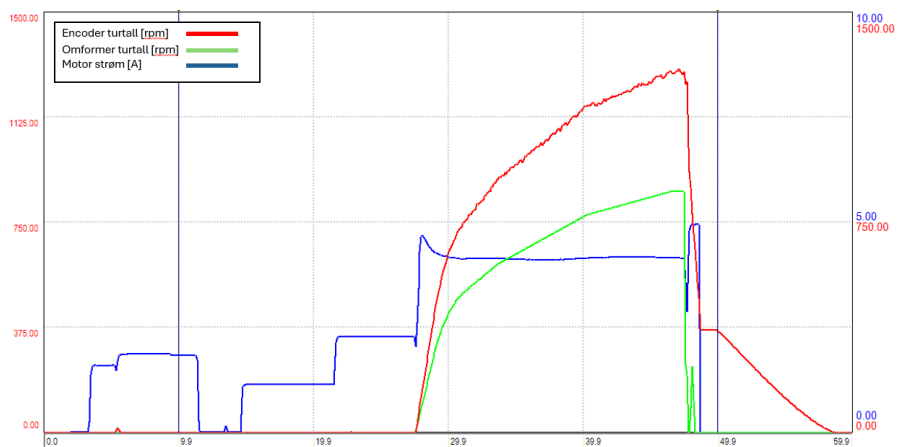
Det ble brukt PC program *ABB Drive Composer* med hensikt om å utvide overvåking under testing av modell. Vi fikk problemer med at CW-omformer ikke brukte avlest turtall i sine beregninger, og at vi derfor avviker fra faktisk turtall med 300 rpm. I figur 25 ble maskin kjørt som motor med 600rpm som settpunkt, mens encoder leste 900rpm.



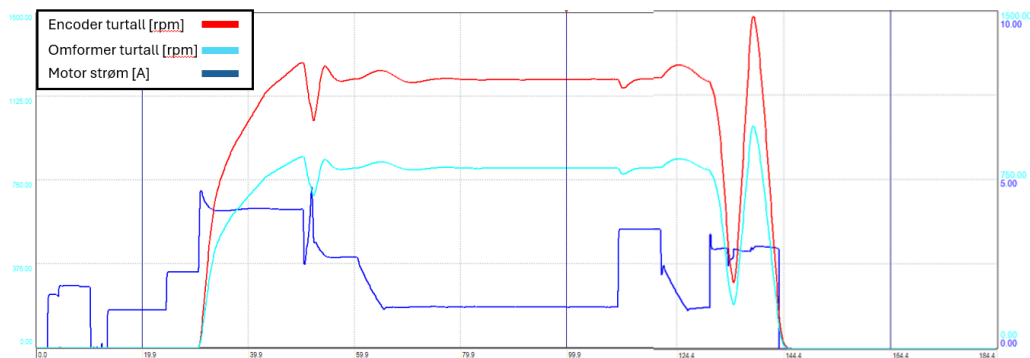
**Figur 25: Encoder turtallsmåling sammenlignet med turtall fra omformer ved motordrift.**

Vi forsøkte en ny ID run med turtallsmåling og DTC-styring, se figur 26. Her kan vi se at omformer fortsatt ikke bruker avlest turtall, og ID run feilet når avlest turtall nådde ca. 1250 rpm. Feilkode 7310 ble observert. Når vi forsøkte motordrift av omformer uten gjennomført ID run, stoppet omformer umiddelbart og feilkode 2310 ble observert.

Labansvarlig kom i kontakt med ABB, og det kom fram at DTC er en veldig sensitiv styringsmetode. Siden BDFIG har to statorviklinger, vil magnetfeltet og fluksen være veldig kompleks. Det ble derfor anbefalt at vi brukte scalar istedenfor DTC. Vi fant dokumentasjon på oppsett av encoder i omformer, og satte opp encoder etter dette dokumentet. Oppkobling av encoder ble gjort i henhold til *FEN-31 User's manual* hvor det ble brukt *differential push-pull* kobling. Vi kjørte deretter en ny ID run med scalar styring og nytt oppsett, og ID run ble gjennomført men fortsatt med samme turtalls avvik som tidligere, se figur 27.



**Figur 26: Strøm og turtall ved DTC ID run, ikke bestått.**

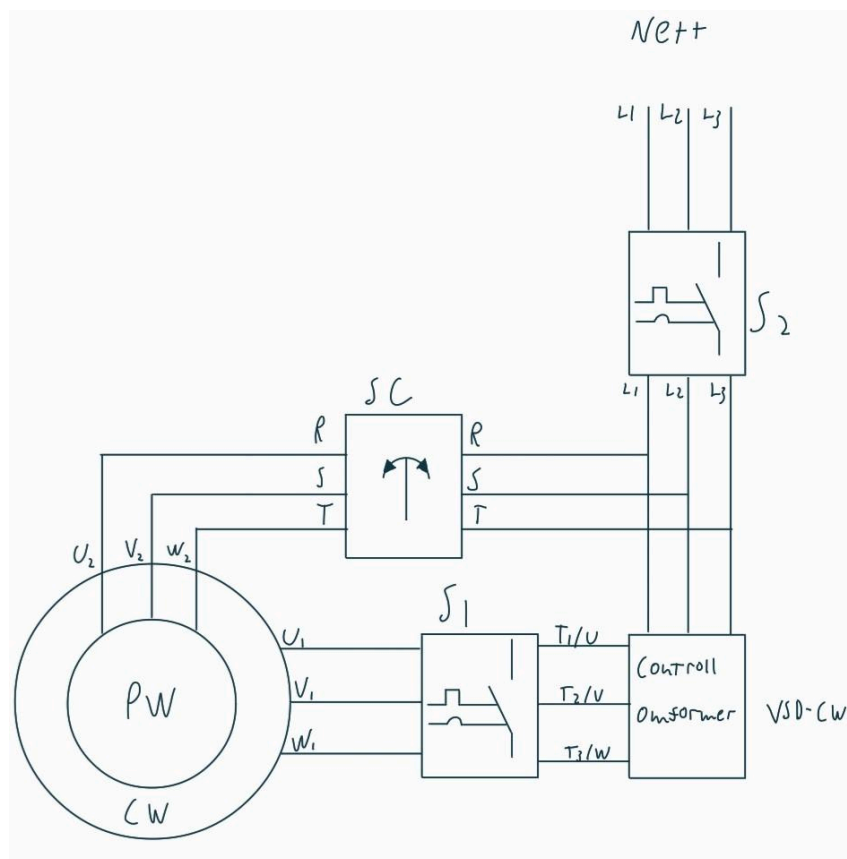


**Figur 27: Bestått ID run, Normal, Scalar.**

Feilkode (HEX)	Betydning
FF61	Motor ID run was not completed successfully.
7310	Overspeed
2310	Output current has exceeded internal fault limit.

**Tabell 3: Observerte feilkoder.**

Mer detaljert beskrivelse av feilkoder og mulige løsninger finnes i fabrikants Manual for ACS880.



**Figur 28: Oppdatert koblingskjema.**

På den siste dagen i laboratoriet ble det oppdaget av laboratorieansvarlige at koblingene på klemmebrettet var utført motsatt. Dokumentasjon fra produsent hadde omvendt nummerering for lavhastighet- og høyhastighetvikling enn faktisk nummerering på klemmebrettet. Dette medførte at omformereren var koblet til PW og nettet koblet til CW. Når feilen ble oppdaget og kobling omgjort, fikk vi kjørt suksessfull ID run ved bruk av Scalar styring.

Vi forsøkte å kjøre BDFIG ved simple induction mode med kun PW. Da drivmaskinen ble satt til en hastighet på [1510, 1520]rpm uten at CW var aktivert, klarte maskinen å generere effekt mot nettet. Den aktive effekten ble målt med en Fluke 435, og det ble registrert en markant økning i effektmålingen ved små økninger i pådrag; en økning fra 1510-1520 rpm resulterte i en effekt mot nett økte fra 0,6 kW til 1,7 kW. Den reaktive effekten lå på rundt 3 kVAr (kapasitiv). Problemene med turtallsmålingen for CW fortsatte, og når CW ble aktivert, registrerte omformereren turtallet i motsatt retning, noe som førte til at den opererte som en bremse. Dette resulterte i at CW trakk 400W fra nettet.

Endring i kobling på klemmebrett kan ses i figur 28.



## 6.2 Videre arbeid

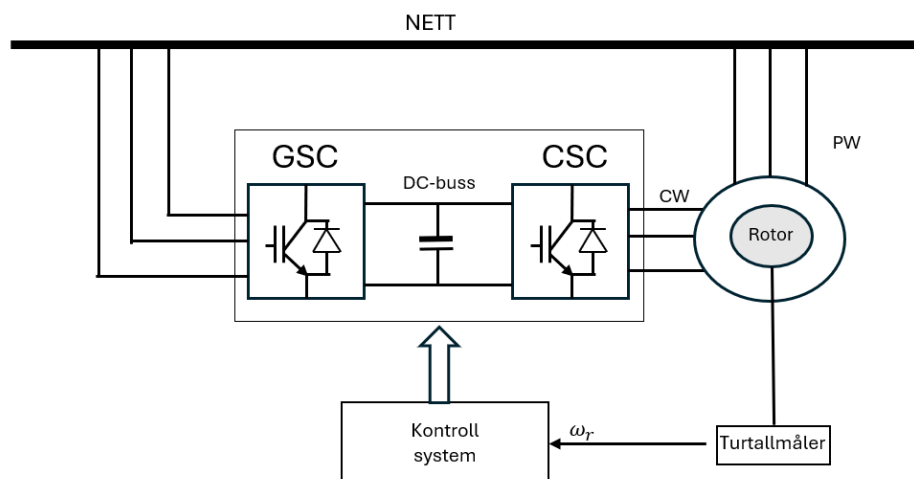
Slik systemet er nå, ser vi for oss at det er to mulige løsninger. Det er mulig at systemet vil fungere med eksisterende utstyr, men da må en sette seg mer inn i hvordan omformer virker, og sikre at omformer bruker avlest turtall og ikke estimert turtall.

Alternativt kan en bruke en ekstern kontrollør med regulator for å få systemet til å operere slik vi ønsker. Det kan virke som at utstyret opplever problemer med to statorviklinger, og at et skreddersydd kontrollsystem er nødvendig. Vi forestiller oss at det ville være fordelaktig med et kontrollsystem der frekvensen reguleres direkte, i stedet for å regulere turtallet. Den eksterne kontrolløren får turtallet til rotor fra turtallsmåler, og kalkulerer nødvendig elektrisk frekvens ved bruk av formel 4. Denne frekvensen sendes så til omformer enten digitalt eller analogt, og omformer leverer ut ønsket frekvens. Regulatoren sørger for et stabilt og responsivt system. Omformereren har innebygget PID-regulator og kan muligens brukes for regulering. Området frekvensen vil variere med finnes ved å sette inn maks og minimum rotor hastigheter i formel 11. Dette vil være arbeidsområdet til CW i frekvens.

$$\omega_{cw} = \omega_r * (p_{pw} + p_{cw}) - \omega_{pw} \quad (11)$$

$$\omega_{cw} = 14\pi * (2 + 3) - 100\pi = -30\pi \text{ rad/s} \rightarrow f_{cw} = \frac{-30\pi}{2\pi} = -15 \text{ Hz}$$

$$\omega_{cw} = 26\pi * (2 + 3) - 100\pi = 30\pi \text{ rad/s} \rightarrow f_{cw} = \frac{30\pi}{2\pi} = 15 \text{ Hz}$$



**Figur 29: BDFIG modell med kontrollsystem.**

Det er mulig å utvide kontrolleren ved å lese av strøm og spenning og estimere moment og fluks. Det er da mulig å lage en DTC kontroller som er innstilt for BDFIG. Kontrollsystemet som blir foreslått for DFIG i studien [23] er noe som kan undersøkes og anvendes til styring av BDFIG modellen. En skisse for systemet kan ses i [23].

## 7. Konklusjon

Formålet med oppgaven var å utvikle en dypere forståelse av de maskintekniske aspektene ved BDFIG. Dette ble oppnådd gjennom en omfattende litteraturstudie hvor data og forskningsresultater fra flere studier ble samlet. Ved siden av å bygge en teoretisk forståelse av BDFIG-systemet, var målet også å konstruere en laboratoriemodell. Denne modellen skulle driftes og undergå ytelsestester for å bestemme systemets virkningsgrad.

Gjennom litteraturstudien utforsket vi teoretiske aspekter ved både DFIG og BDFIG, samt en sammenligning av de to maskintypene. BDFIG inneholder to separate statorviklinger; PW som er direkte koblet til nettet, og CW til en omformer. Denne konfigurasjonen fører imidlertid til en lavere effekttetthet sammenlignet med DFIG grunnet det doble settet med statorviklinger. Rotor-designet eliminerer behovet for børster og sleperinger og benytter vikingssystemer som NL eller Cage+NL, som forbedrer dreiemoment og reduserer tap. Denne børsteløse konfigurasjonen medfører også betydelig lavere vedlikeholdskostnader sammenlignet med DFIG.

Det kom fram at polpar kombinasjoner hadde stor innvirkning på egenskapene og ytelse til BDFIG. Det ble funnet at UMP avhenger av maskinens polpar kombinasjoner i PW og CW. Mens polpar-kombinasjonen 2/3 ville medføre UMP, viste det seg at kombinasjonene 2/4 og 4/6 ville medføre minimalt med UMP. Ved drift opplever BDFIG diverse tap, inkludert stator- og rotor jerntap, friksjons- og viftetap, samt belastning betingede tap fra maskinens mekaniske og elektriske komponenter. Disse tapene kan reduseres ved å optimalisere design og driftsparametere, spesielt gjennom intelligent styring av omformere, noe som bidrar til generatorens overordnede effektivitet og økonomiske ytelse.

Opprinnelig var planen å gjennomføre tre ulike tester av BDFIG på laboratoriet: parameterestimering, sammenligningstest, og ytelsestest. På grunn av forsinket oppstart av laboratoriarbeidet, ble det tidlig besluttet å konsentrere innsatsen om ytelsestesten. I løpet av denne perioden hadde vi få aktive arbeidsdager, grunnet nye utfordringer som oppsto. Selv om vi gjorde små fremskritt hver dag, lyktes vi dessverre ikke med å fullføre ytelsestesten. Problemet med omformer og dens bruk av estimert turtall gjorde det problematisk å fortsette testingen. Det ble klart at vi trengte et mer avansert kontrollsystem dersom vi ikke fikk løst problemer med omformer. Ved bruk av kontrollsystemet vil en kunne optimalisere samspillet mellom omformeren og BDFIG. Tidsbegrensningen hindret oss i å bygge et kontrollsystem

og fortsette med testingen, men et forslag til videre utvikling av oppgaven med mulige fremgangsmåter presenteres i kapittel 6.2.

## 8. Forkortelser

A	-	Ampere
AC	-	Vekselsstrøm (Alternating Current)
BDFIG	-	Brushless Doubly Fed Induction Generator
BDFIM	-	Brushless Doubly Fed Induction Machine
Cage+NL	-	Nested Loop + Cage
CIM	-	Cascade Induction Mode
CSC	-	Control Side Converter
CW	-	Control Winding (Kontroll viklinger)
DC	-	Likestrøm (Direct Current)
DFIG	-	Doubly Fed Induction Generator
EMF	-	Elektromagnetisk Felt
GSC	-	Grid Side Converter
IGBT	-	Insulated Gate Bipolar Transistor
NL	-	Nested Loop
$p_{cw}$	-	Polpar kontrollvikling (CW)
$p_{pw}$	-	Polpar kraftvikling (PW)
PW	-	Power Winding (Kraft viklinger)
SC	-	Squirrel Cage
SIM	-	Simple Induction Mode
THD	-	Total Harmonic Distortion
UMP	-	Unbalanced Magnetic Pull

V	-	Volt
VSD	-	Variable Speed Drive (Frekvensomformer)
VSI	-	Voltage Source Inverter

# 9. Fremdriftsplan

				2024																																	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24										
				01. jan	08. jan	15. jan	22. jan	29. jan	05. feb	12. feb	19. feb	26. feb	04. mars	11. mars	18. mars	25. mars	01. apr	08. apr	15. apr	22. apr	29. apr	06. mai	13. mai	20. mai	27. mai	3. jun	10. jun										
				05. jan	12. jan	19. jan	26. jan	02. feb	09. feb	16. feb	23. feb	01. mars	08. mars	15. mars	22. mars	29. mars	05. apr	12. apr	19. apr	26. apr	03. mai	10. mai	17. mai	24. mai	31. mai	7. jun	14. jun										
#	Aktivitet	Start dato	Slutt dato	Fremdrift	Ansvarlig																																
1	Første møte med veileder	02.jan	02.jan	100 %	Alle	1t																															
2	Forprosjekt arbeid	11.jan	05.feb	100 %	Alle	25t	25t	25t	25t	25t																											
3	Forprosjekt innlevering		05.feb	100 %	Alle																					10t	25t	5t									
4	Metode undervisning	12.jan	23.feb	100 %	Institutt	3t	3t	3t	3t	3t	3t																										
5	Utstyr bestilling			100 %	Oppdragsgiver																																
6	Månedlig møte med veileder			100 %	Alle	1t																			1t	1t	1t										
7	Litteratursøk	29.jan	29.apr	100 %	Alle																			5t	5t												
8	Konstruksjon Lab-modell	14.feb	xx.april	100 %	Alle																			10t	25t	5t											
9	Sluttkontroll, test modell	xx.april	xx.april	100 %	Alle																			5t													
10	Bacheloroppgave arbeid			100 %	Alle																			20t	20t	20t	20t	20t	20t	20t	20t	20t	20t	20t	20t	15t	20t
11	Midtveis presentasjon forber	25.mar	05.apr	100 %	Alle																			1t													
12	Midtveis presentasjon		05.apr	100 %	Alle																			1t													
13	Refleksjonsnotat skrivning	29.apr	06.mai	100 %	Alle																			5t	5t	5t	5t										
14	Refleksjonsnotat innlevering		06.mai	100 %	Alle																			1t													
15	Eksamens periode	07.mai	28.mai	25 %	Alle																																
16	Bacheloroppgave innlevering		21.mai	100 %	Alle																																
17	Bacheloroppgave presentasjon		04.jun		Alle																			1t													
18	Lage EXPO plakat	28.mai	03.jun		Alle																			5t	1t												
19	EXPO		12.jun		Alle																			5t													

Tabell 4: Fremdriftsplan i form av gantt skjema.

## 10. Referanser

- [1] L. Sivertsen, *Elektriske Maskiner*, 2. utg, Norge: Fagbokforlaget, 2023.
- [2] A. Petersson, "Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines," Ph.D. dissertation, Dept. of Electric Power Eng., Chalmers Univ. of Technol., Göteborg, Sweden, 2005.
- [3] "Slip Ring Brushes: A Detailed Overview," Hangzhou Grand Technology, 23. april 2023. [På nett]. Tilgjengelig: <https://www.grandslipring.com/slip-ring-brushes/>. [Besøkt: 15. mars 2024].
- [4] R. Carlson, H. Voltolini, F. Runcos and K. Kuo-Peng, «A performance comparison between brush and brushless doubly fed asynchronous generators for wind power systems», *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, April. 2006.
- [5] R. A. McMahon, X. Wan, E. Abdi-Jalebi, P. J. Tavner, P. C. Roberts and M. Jagiela, "The BDFM as a Generator in Wind Turbines," *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Portoroz, Slovenia, 2006, pp. 1859-1865, doi: 10.1109/EPEPEMC.2006.4778676.
- [6] O. I. Olubamiwa and N. Gule, "A Review of the Advancements in the Design of Brushless Doubly Fed Machines," *Energies*, vol. 15, no. 3, p. 725, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en15030725>
- [7] T. D. Strous, X. Wang, H. Polinder and J. A. B. Ferreira, "Finite element based multi-objective optimization of a brushless Doubly-Fed Induction Machine," *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Coeur d'Alene, ID, USA, 2015, pp. 1689-1694, doi: 10.1109/IEMDC.2015.7409291.
- [8] S. Abdi, E. Abdi and R. McMahon, "A Study of Unbalanced Magnetic Pull in Brushless Doubly Fed Machines," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 3, pp. 1218-1227, Sept. 2015, doi: 10.1109/TEC.2015.2394912.



- [9] X. Wang, H. Polinder, D. Lahaye and J. A. Ferreira, "FE based multi-objective optimization of a 3.2MW brushless doubly-fed induction machine," *2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, Nottingham, UK, 2017, pp. 89-94, doi: 10.1109/WEMDCD.2017.7947729.
- [10] X. Wang, T. D. Strous, D. Lahaye, H. Polinder and J. A. Ferreira, "Modeling and Optimization of Brushless Doubly-Fed Induction Machines Using Computationally Efficient Finite-Element Analysis," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 6, pp. 4525-4534, Nov.-Dec. 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2593715.
- [11] R. C. Robinson, "The Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in Synchronous and Induction Motors," in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 62, no. 10, pp. 620-624, Oct. 1943, doi: 10.1109/T-AIEE.1943.5058614.
- [12] S. Abdi, E. Abdi and R. A. McMahon, "A study of rotor eccentricities effects on brushless doubly fed machines performance," *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Coeur d'Alene, ID, USA, 2015, pp. 66-71, doi: 10.1109/IEMDC.2015.7409038.
- [13] D. G. Dorrell, A. M. Knight and R. E. Betz, "Issues with the design of brushless doubly-fed reluctance machines: Unbalanced magnetic pull, skew and iron losses," *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Niagara Falls, ON, Canada, 2011, pp. 663-668, doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994890.
- [14] O. I. Olubamiwa and N. Gule, "Design and optimization of a Cage + Nested loops rotor BDFM," *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Gothenburg, Sweden, 2020, pp. 1868-1874, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270698.
- [15] "Slip Ring Brushes: A Detailed Overview," Hangzhou Grand Technology, 23. april 2023. [På nett].  
Tilgjengelig: <https://www.grandslipring.com/squirrel-cage-rotor/>

- [16] J. Ge, W. Xu, Y. Liu and F. Xiong, "Novel Equivalent Circuit Model Applicable to All Operation Modes for Brushless Doubly Fed Induction Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12540-12550, Dec. 2022, doi: 10.1109/TIE.2022.3144567.
- [17] X. Wang, T. D. Strous, D. Lahaye, H. Polinder, and J. A. Ferreira, "Harmonics study of nested-loop rotors in brushless doubly-fed induction machines," in *Proc. XXII Int. Conf. Electr. Mach. (ICEM)*, Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 371-377, doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732553.
- [18] NAVEED UR REHMAN MALIK "Modelling, Analysis, and Control Aspects of a Rotating Power Electronic Brushless Doubly-Fed Induction Generator," Doctoral Thesis in Electrical Machines and Drives Stockholm, Sweden 2015.
- [19] C.V.S. Anirudh and V. Seshadri Sravan Kumar, «Enhanced modelling of doubly fed induction generator in load flow analysis of distribution systems,», *IET renewable power generation*, 2021-04, Vol. 15. doi:[10.1049/rpg2.12077](https://doi.org/10.1049/rpg2.12077)
- [20] M. Yousefian, H.A. Zarchi, H. Gorginpour, "Modified steady-state modelling of brushless doubly-fed induction generator taking coreloss components into account," *IET electric power applications*, 2019-09, Vol. 13 (9), doi:[10.1049/iet-epa.2019.0133](https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0133)
- [21] M.E.H. Al-Kharbasy "Enhancement Protection and Operation of The Doubly Fed Induction Generator During Grid Fault," Masteroppgave, Department of Electrical Power Engineering, South Valley University, Qena, Egypt, 2012.
- [22] "No-load Test of Induction Motor & Blocked Rotor Test of Motor." Nettsted: [electricaltechnology.org](http://electricaltechnology.org).  
URL:<https://www.electricaltechnology.org/2022/07/no-load-test-induction-motor-block-rotor-test.html>
- [23] Y. Sahri, S. Tamalouzt, S.L. Belaid, "Direct Torque Control of DFIG Driven by Wind Turbine System Connected to the Grid", 2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA), Algiers, Algeria, 2018, doi: 10.1109/ICWEAA.2018.8605083.