



Høgskulen  
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE:

BO19E-52 Dobbeltmatet Asynkronmaskin

---

*Robin Vågstøl*

Robin Vågstøl

*Sindre Ranaweera*

Sindre Ranaweera

*Øystein Edvardsdal*

Øystein Edvardsdal

29. mai. 2019

# 1 Dokumentkontroll

<i>Rapportens tittel:</i> BO19E – Dobbelmatet asynkronmaskin	<i>Dato/Versjon</i> 29. mai. 2019/1.5
	<i>Rapportnummer:</i> B019E-52
<i>Forfatter(e):</i> Robin Vågstøl Sindre Ranaweera Øystein Edvardsdal	<i>Studieretning:</i> HELK16
	<i>Antall sider m/vedlegg</i> 42
<i>Høgskolens veileder:</i> Shujun Zhang	<i>Gradering:</i> Åpen
<i>Eventuelle Merknader:</i> Vi tillater at oppgaven kan publiseres.	

<i>Oppdragsgiver:</i> HVL	<i>Oppdragsgivers referanse:</i> Shujun Zhang
<i>Oppdragsgivers kontaktperson(er) (inkludert kontaktinformasjon):</i> Shujun Zhang <a href="mailto:Shujun.zhang@hvl.no">Shujun.zhang@hvl.no</a> +4755587199	

Revisjon	Dato	Status	Hvem
1.1	13.02	Overskrifter og temaer	Øystein
1.2	26.03	Ferdigsatte hovedpunkt	Alle
1.3	27.03	Skriving	Øystein
1.4	28.03	Skriving	Alle
1.5	30.05	Første utkast	Alle

## 2 Forord

Vi ønsker å takke følgende personer som har bidratt til denne rapporten. Deres bidrag har gjort oppgaven lettere å gjennomføre.

Shujun Zhang, veileder

- Takk for god og stødig veiledning gjennom høsten. Du har vært behjelpelig med det meste og har også gitt og råd og tips fortløpende i semesteret. Han har også vært tilgjengelig når vi har hatt behov.

Lars Manger Ekroll, labingeniør

- Takk for hjelp med å undersøke muligheter for å få gjennomført en testbenk og god rådgivning. Stilte seg disponibel når vi ikke hadde noe mulighet til å gjennomføre et arbeidskrav i oppgaven og hjalp oss med mulige løsninger

Kronbar

- Takk for lån av arbeidsplass. Det å finne et sted å jobbe med oppgave er ikke alltid like lett. Der har Kronbar vært behjelpelig med arbeidsplass og arbeidsro.

### 3 Sammendrag

Et av de store politiske spørsmålene i dag og i tiden fremover er hvordan vi skal forholde oss til fornybare ressurser og hvordan vi på best mulig måte kan utnytte denne energien. Her er vindenergi sentralt, og denne sektoren har utviklet seg enormt de siste par tiårene. Vår oppgave ser nærmere på generatorene som blir brukt, hvordan de henter mekanisk energi fra vind og omgjør det til elektrisk energi, og hva som skiller disse maskinene fra andre alternativ. Oppgaven tar for seg hvem og hva som la grunnlaget for utvikling av dagens dobbeltmatede asynkronmaskiner, samt hva som er dagens «state of the art».

Oppgavens opprinnelige krav med testbenk viste seg å være vanskelige å gjennomføre. Etter flere møter med veiledere og labansvarlige ble det enighet om en simulering i programmet Matlab/Simulink. Litteratursøket og «review»-delen av oppgaven ble fremhevet som et resultat av dette. Det var ønskelig å finne lignende simuleringsprogram for de andre alternativene, med lignende oppsett som dobbeltmatet asynkronmaskinen, men dette viste seg å bli for tidkrevende såpass sent i oppgaven.

## 4 Innholdsliste

1	Dokumentkontroll.....	2
2	Forord.....	3
3	Sammendrag.....	4
4	Innholdsliste.....	5
5	Figuroversikt.....	6
6	Tabelloversikt.....	6
7	Innledning.....	7
7.1	Oppdragsgiver.....	7
7.2	Problemstilling.....	7
7.2.1	DFIG.....	7
7.2.2	Vindkraft i dag.....	9
8	Kravspesifikasjon.....	12
8.1	«State of the art» og litteratursøk.....	12
8.2	Testing av DFIG.....	12
8.3	Endelige krav.....	13
9	Analyse av problemet.....	14
9.1	Induksjonsprinsippet og implementering i asynkronmotor.....	14
9.1.1	Faraday & Maxwell.....	14
9.1.2	Induksjon.....	15
9.1.3	Asynkronmotor.....	16
9.2	Vindmøllens oppbygning.....	18
9.3	Vindmølleparker.....	21
9.4	Teori.....	22
9.4.1	Generelt.....	22
9.4.2	Matlab/Simulink simuleringer.....	23
9.5	Steady-State operasjon av DFIG.....	30
9.6	DFIG rolle i dag.....	33
9.7	DFIG slipring kontra børsteløse.....	35
10	Diskusjon.....	36
11	Metode.....	36
12	Konklusjon.....	37
13	Referanser.....	38

## 5 Figuroversikt

Figur 1: DFIG i vindmølle koblingskjema .....	8
Figur 2: Vindkraft i Norge 2017.....	9
Figur 3: Oversikt over årsmiddelvind i Norge .....	11
Figur 4: Eksisterende og planlagte vindmøller i Norge.....	11
Figur 5 Simulink vindpark med DFIG .....	13
Figur 6 Strøm i spole. [4].....	14
Figur 7 Magnetisk flux gjennom areal, og prinsipp for elektriske maskiner. [5] .....	15
Figur 8 Forholdet mellom flux og EMF. [6] .....	16
Figur 9 Slip/dreiemoment kurve for asynkronmaskin [7].....	17
Figur 10 Eksempel på støykart fra [8] .....	19
Figur 11: Illustrasjon av støynivå rundt en vindmølle [8] .....	19
Figur 12: Illustrasjon av en vindmølles oppbygning [9] .....	20
Figur 13 Eksempel vindpark sammenkobling .....	21
Figur 14 Simulering 1 .....	24
Figur 15 Simulering 2 .....	25
Figur 16 Simulering 3 .....	26
Figur 17 Simulering 4 .....	27
Figur 18 Simulering 5, mer reell simulering.....	28
Figur 19 Data fra simulering av DFIG .....	29
Figur 20: To magneter som står normalt på hverandre.....	30
Figur 21: Figuren viser interaksjonen mellom turtall og frekvensen av magnetfeltet. [2].....	34
Figur 22: Figuren viser en børsteløs motor og en med børster .....	35

## 6 Tabelloversikt

Tabell 1 Utvalg vindmøller med pris og generatortype .....	20
Tabell 2: Forkortelser og ordforklaringer.....	40
Tabell 3: Timeliste .....	42

## 7 Innledning

### 7.1 Oppdragsgiver

Oppdragsgiveren på denne oppgaven er Høgskulen på Vestlandet, institutt for elektrofag. Instituttet er fordelt inn i følgende studieretninger. Automasjon, elektronikk, elkraft og kommunikasjon. Det finnes også et masterprogram innenfor kommunikasjon ved instituttet. Høgskulen på Vestlandet, campus Bergen ligger på Kronstad, rett utenfor Bergen sentrum, og har per dags dato 9000 studenter og ca. 600 ansatte.

### 7.2 Problemstilling

Det finnes mange forskjellige måter å koble opp generatorer på, og generatorer er noe som blir brukt hyppig i vindmølleindustrien. Det finnes mange forskjellige egenskaper i de forskjellige generatorer. Noen vil naturligvis være bedre egnet til bruk i vindmøller enn andre, og vil da ha visse fordeler når det gjelder å omgjøre den mekaniske energien i vind om til strøm. Denne oppgaven skal i all hovedsak ta for seg dobbelmatete asynkronmotorer og hva som er fordelene ved å bruke slike generatorer i vindmøller. Oppgaven skal også ta for seg eventuelle ulemper og se litt generelt på vindmølleindustrien i Norge.

#### 7.2.1 DFIG

DFIG er en induksjons maskin med rotorvikling hvor både rotor og stator er tilkoblet elektriske kilder, derav uttrykket «dobbelt-matet». Rotoren har viklinger som blir matet av trefasestrømmer. Rotorstrømmene etablerer rotorens magnetiske felt. Rotorens magnetfelt samhandler med statorens magnetfelt for å danne dreiemoment. Størrelsen av magnetfeltet er avhengig av forholdet mellom rotor- og statorfeltet, samt vinkelstørrelsen mellom dem. Matematisk så er dreiemomentet vektorproduktet mellom rotor og stator. Konseptuelt er dreiemomentet utviklet av den magnetiske attraksjonen mellom magnetpolene av motsatt polaritet.

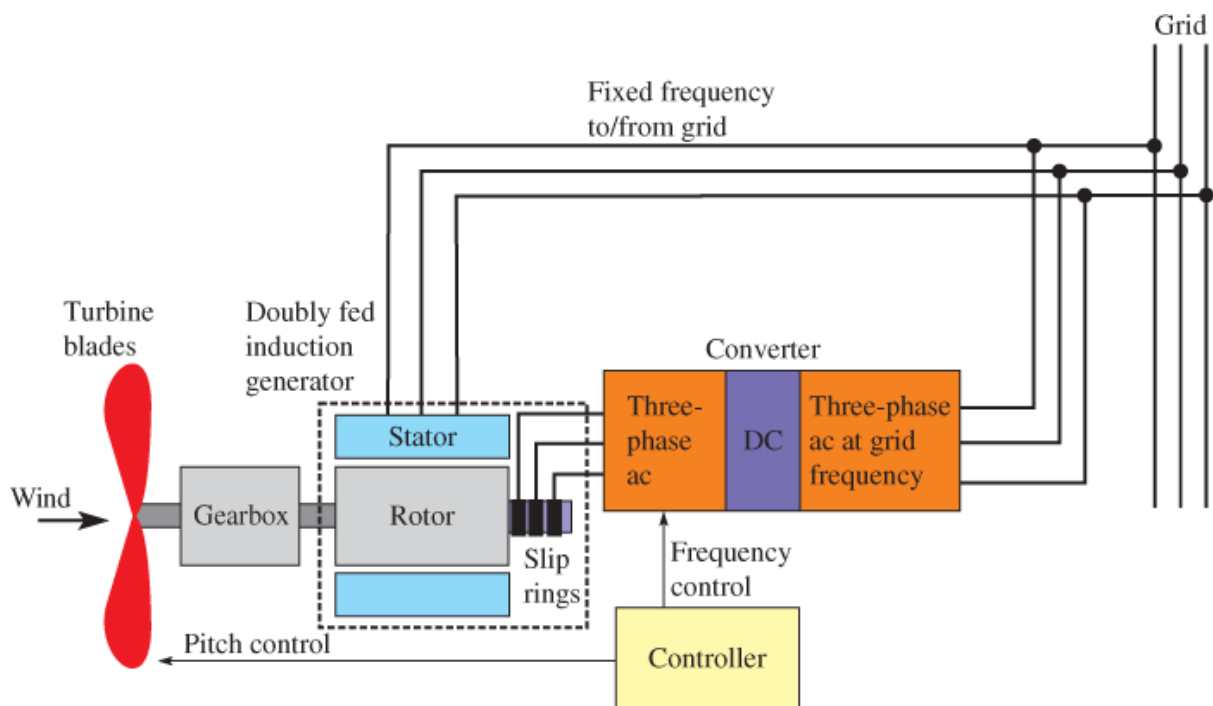
Optimalt dreiemoment er utviklet når de to vektorene står normal på hverandre. Dersom statorviklingen er matet fra en tre-fase balansert kilde så vil statorfluksen ha en konstant størrelse og rotere med synkron hastighet.

Statorsiden har to «parasittiske» komponenter,  $R_S$  og  $L_S$ , som representerer motstanden til statorviklingene og lekkasjeinduktansen til faseviklingen. Lekkasjeinduktansen etterligner all fluksen som genereres av strømmen i statorviklingen, som ikke krysser luft-gapet til maskinen. Det er derfor

ikke nyttig for produksjonen av dreiemoment. Statormotstanden er en naturlig konsekvens av at viklingene har blitt laget av gode ledere, men som har en begrenset ledningsevne. På lik linje med statorkretsen har rotorkretsen også to parasittiske element. Rotorlekkasje,  $L_r$ , og rotormotstanden  $R_r$ . [1]

Hovedgrunnen for å bruke en dobbel-matet induksjons generator er å produsere tre-fase spenning hvor frekvensen til stator er konstant. Med andre ord at frekvensen til stator forblir lik frekvensen til AC kraftnettverket hvor generatoren er tilkoblet. Dette er til tross for variasjoner i generatorrotens hastighet forårsaket av fluktasjoner av den mekaniske kraften som leveres av prime mover (ved for eksempel vindturbin). For å oppnå dette må rotorfrekvensen til AC strømmene som er matet inn i rotorviklingene til DFIG være kontinuerlig justert for å motvirke noen variasjon i rotorhastigheten forårsaket av fluktasjonene.

Rotorfrekvensen til vekselstrømmene som må mates inn i DFIG rotor viklingene for å opprettholde generatorens output statorfrekvens til samme verdi som nettverksfrekvensen til AC kraftnettverket avhenger av rotasjonshastigheten til generatorrotoren, og kan beregnes av følgende ligning: [2] [3]



Figur 1: DFIG i vindmølle koblingsskjema



## 7.2.2 Vindkraft i dag

I 2015 ble det produsert 833,6 TWh fra vindkraft på verdensbasis. USA og Kina er de som produserer mest energi fra vindkraft i verden. Vindkraft er en fornybar energikilde som ikke har noe utslipp under produksjon. Det første vindkraftverket i Norge ble satt i drift i 2002, og Norge hadde i 2017 totalt 33 vindkraftverk med en installert kapasitet på 1188MW, noe som utgjør 3,5% av total installert kapasitet på landsbasis. Dette tilsvarer en normalproduksjon på omkring 3,6 TWh.

Vindkraft er en energikilde hvor produksjonen vil variere med værforholdene. Mer vind vil jo bety høyere produksjon og mindre vind vil jo bety lavere produksjon. Dette gjør at produsert strøm per dag vil variere.

Det ble i 2017 produsert ca. 2,85 TWh i fra vindkraft i Norge. Dette var en økning fra året før med 0,8 TWh. Økningen kom som følge av to hovedårsaker

1. Gode vindforhold i 2017
2. Igangsettelse av nye vindkraftverk med en installert kapasitet på 324 MW.

Dette utgjorde 1,9% av Norges totale energiproduksjon i 2017. Hvis vi sammenligner dette med Danmark så utgjorde vindkraft 40% av energiproduksjonen der, noe som er en vesentlig større del enn det Norge produserte fra vindkraft. Med dagens klimadiskusjoner vil behovet for fornybare energikilder øke betraktelig i perioden fremover, og vindkraft er en av de energikildene som mange land ønsker å satse på.

Vindkraftverk	Eier	I drift år	Antall turbiner	Installert Ytelse [MW]	2017 produksjon [GWh]
Andøya	Andøya Energi AS	1991	1	0,4	0,5
Fjeldskår	Norsk Miljø Energi AS	1998	5	3,8	4,8
Harøy, Sandøy	Sandøy Energi AS	1999	5	3,8	8,9
Smøla I&II	Smøla Vind AS (Statkraft)	2002	68	150,4	358,5
Havøygavlen	Arctic Wind AS	2002	16	40,5	90,3
Utsira I&II	Solvind Prosjekt AS	2004	2	1,2	3,9
Hitra	Hitra Vind AS (Statkraft)	2004	24	55,2	141,7
Nygårdsfjellet I&II	Nygårdsfjellet Vindpark AS	2005	14	32,2	97,5
Kjøllefjord	Kjøllefjord Vind AS (Statkraft)	2006	17	39,1	107,7
Valsneset	TrønderEnergi Kraft AS	2006	5	11,5	33,7
Bessakerfjellet	TrønderEnergi Kraft AS	2008	25	57,5	164,3
Mehuken II&III	Kvalheim Kraft AS	2010	11	25,3	68,3
Høg-Jæren I&II	Jæren Energi AS	2011	32	73,6	239,0
Åsen II	Solvind Åsen AS	2012	2	1,6	4,2
Fakken	Troms Kraft AS	2012	18	54,0	133,5
Ytre Vikna	Sarepta Energi AS	2012	17	39,1	116,2
Lista	Lista Vindkraftverk AS	2012	31	71,3	238,7
Midtfjellet	Midtfjellet Vindkraft AS	2013	44	110,0	324,8
Raggovidda	Varanger Kraft AS	2014	15	45,0	190,8
Røyrrmyra	Røyrrmyra Vindpark AS	2015	3	2,4	8,2
Skomakerfjellet	TrønderEnergi Kraft AS	2015	4	13,2	37,9
Annen vindkraft*			109	357,1	475,2
sum			468	1188	2849

\*Vindkraftverk som ikke var i normal drift i 2017: Handhammerfjellet, Hywind, Tellnes, Hamnefjell, Eggersund, Valsneset

Figur 2: Vindkraft i Norge 2017.

Fordelene med vindkraft er mange.

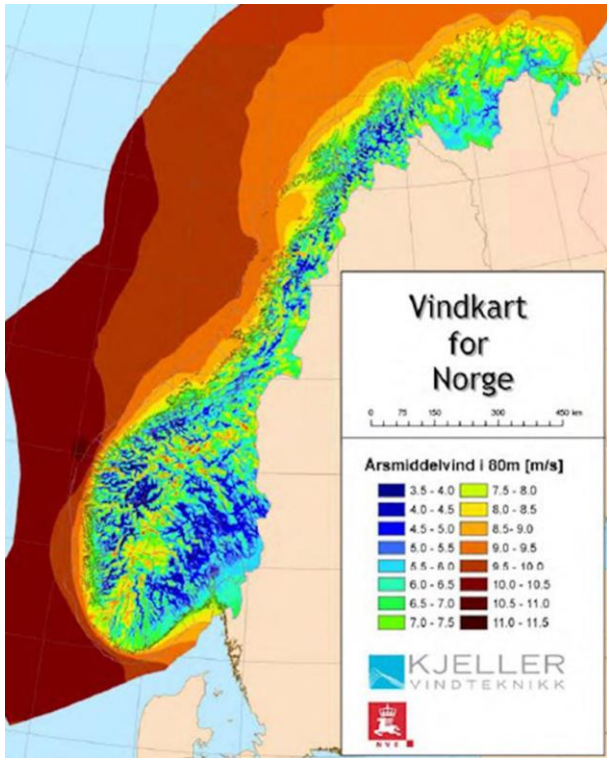
- Vindkraft kan i større grad en f.eks vannkraft flyttes til ledig nett og forbruk.
- Utbygging av vindkraft er i stor grad reversible naturinngrep.
- Mer kraftproduksjon av kraftproduksjon med lav marginalkostnad, slik som vindkraft vil gi billigere strømpriser for konsumentene.

Det finnes også noen ulemper i forhold til vindkraft.

- Kan generere støy innenfor 1km rekkevidde.
- Kan være negativt for fugleliv, men dette varierer
- Vind er en energikilde som kan variere mye, dette vil jo da føre til en mer ujevn produksjon av energi. Da vil det være nødvendig med reserve kraftverk som kan produsere strøm når det blåser lite
- En vindmølle vil alltid synes i naturen og for noen vil dette være skjemmende.

Vindkraft er også en energikilde som miljøvernorganisasjoner støtter og Bellona, Natur og ungdom, og Zero har sagt ja til utbygging av vindkraft i Norge. Statkraft holder nå på å bygge Nordens største landbaserte vindmøllepark på Fosen. Deretter vil de også bygge parker i Kvinesdal og Remmafjellet.

Deretter har Statkraft-sjef Christian Rynning-Tønnesen uttalt at de ikke kommer til å satse på videre utbygging av vindkraft i Norge grunnet fallende kraftpriser. Han presiserer også at de kommer til å satse på landbasert vindkraft i andre land rundt om i Europa.



Figur 3: Oversikt over årsmiddelvind i Norge



Figur 4: Eksisterende og planlagte vindmøller i Norge.

## 8 Kravspesifikasjon

### 8.1 «State of the art» og litteratursøk

Oppgaven går i all hovedsak ut på å undersøke og sammenligne en dobbelmatet asynkronmaskin opp mot standard en asynkronmaskin. Hovedfokus ligger her på børsteløse maskiner, og hvordan disse fungerer i forhold til tradisjonelle motorer med børster. Hva er det som gir akkurat DFIG fortrinnet ovenfor andre maskiner? Samtidig skal “State of the art” innenfor asynkronmaskinens verden kartlegges.

Oppgavens opprinnelige krav:

#### ***Innledning***

*Teoretisk arbeid for å bygge opp kunnskap om dobbelmatete asynkronmaskiner med fokus på børsteløse maskiner. Det blir et innledende litteraturstudium for å kartlegge «State of the art». Videre er det ønskelig å sette opp en laboratorietestbenk for å kjøre grunnleggende tester og kunne se nærmere på fordeler/ulempene med disse maskinene kontra tradisjonelle asynkronmaskiner.*

#### ***Faglige elementer***

*Litteratursøk. Bygge opp kompetanse*

*Planlegge oppbygning av testbenk*

*Realisere praktisk laboratorieoppkobling*

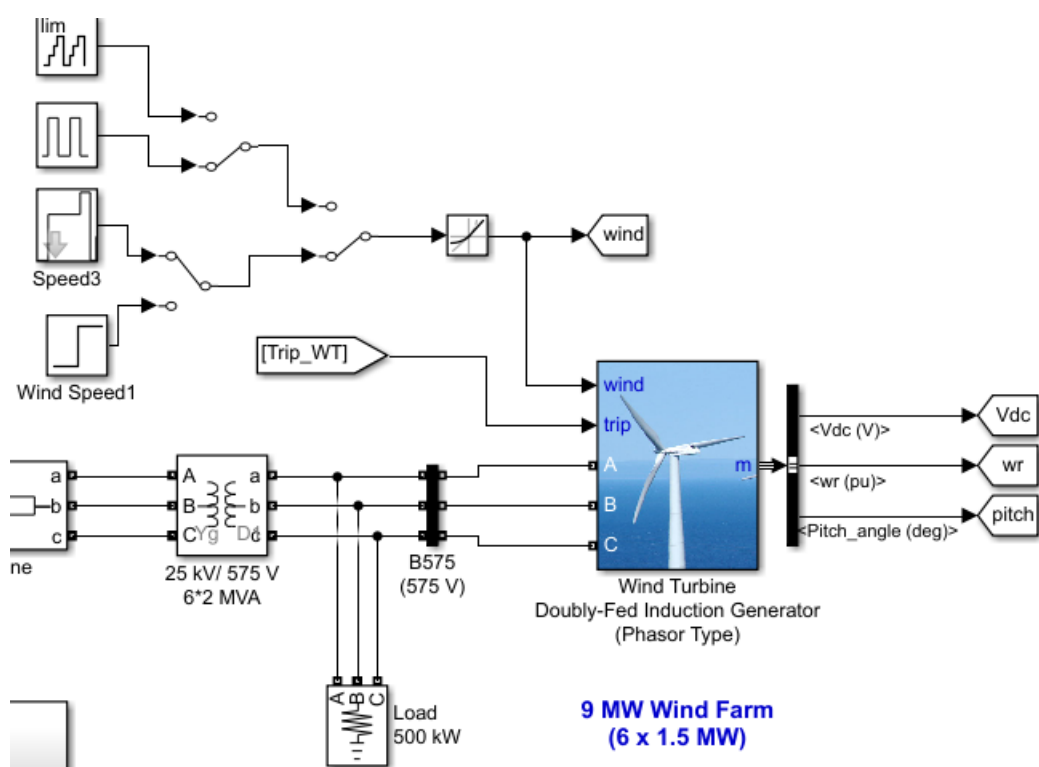
### 8.2 Testing av DFIG

Det var spesifisert i oppgaven at det var ønskelig å designe tester for disse maskinene, noe som skulle vise seg å være vanskelig. Ettersom at oppgaven var i regi av HVL, ble det antatt at skolen hadde en slik generator tilgjengelig for oss, noe som ikke stemte. Oppgavens krav kunne derfor ikke oppfylles slik oppgaven ble gitt. Etter møter med studiekeordinator og veileder ble det lagt frem ideer til hvordan dette problemet kunne løses. Forslaget var å koble to asynkronmaskiner på samme aksling, der maskinene hadde forskjellig poltall. Her ville motor nummer to ha statorviklinger til en omformer, som deretter var koblet til nettet. Dette forslaget ble tatt videre til overingeniør på HVL, som også ansvarlig for laboratoriet. I dette møtet ble ideen med to asynkronmotorer lagt bort, da

det ville ikke vært gunstig og tidsfornuftig å gjennomføre. Det var også en del elementer med selve konstruksjonen som viste seg å være vanskelig. Deretter var det teorien rundt dette. Hvordan maskinene ville oppføre seg under forskjellige scenarier, det var fare for at den ene maskinen ville kjøre som motor i området fra 1450 – 1570 rpm, eller med en slip fra 3,33% - 4,67%. Dette forslaget ble ikke videre undersøkt.

### 8.3 Endelige krav

Etter mange møter og e-poster ble de endelige kravene satt i mars etter møtet med veileder. Her ble alle tidligere møter oppsummert og nye krav godkjent. Her ble den opprinnelige teoridelen styrket og utvidet. Flere andre maskiner blir tatt med i sammenligningene, samt et simuleringsprogram på Matlab. Dette er et ferdigprogram med egne målingsfunksjoner for de ulike verdiene som vindhastighet, effekt, endringer i vind o.l. Dette programmet erstatter den fysiske testingen oppgaven opprinnelig spesifiserte så langt det lar seg gjøre og er designet for vindturbiner.



Figur 5 Simulink vindpark med DFIG

Figuren viser delen av programmet som var sentral. Videre til venstre har man linjer og transformatorer, men disse beholdt samme verdier gjennom simuleringene. Det er også lagt inn flere mulige vindscenarier.

## 9 Analyse av problemet

### 9.1 Induksjonsprinsippet og implementering i asynkronmotor

#### 9.1.1 Faraday & Maxwell

Fysikeren Michael Faraday oppdaget fenomenet med elektromagnetisk induksjon på 1800-tallet. Det Faraday oppdaget var at endringer i det magnetiske feltet rundt en spole vil føre til at en elektromagnetisk kraft blir produsert, også kalt EMF etter forkortelsen på engelsk. Et oscillerende magnetfelt vil generere strøm i lederen som er utsatt for disse endringene.

$$E = \frac{\Phi}{dt}$$

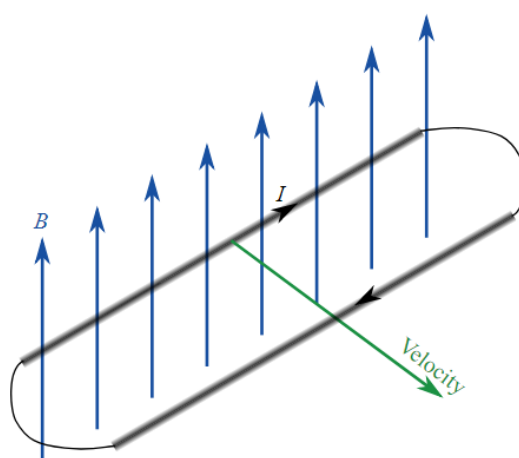
$$E = \text{Indusert spenning [V]}$$

$$\Phi = B \times A = \text{Magnetisk flux [Wb]}$$

$$dt = \text{Endringer i tid [s]}$$

$$B = \text{Magnetisk felt [T]}$$

$$A = \text{Arealet spolen dekker [m}^2\text{]}$$



Figur 6 Strøm i spole. [4]

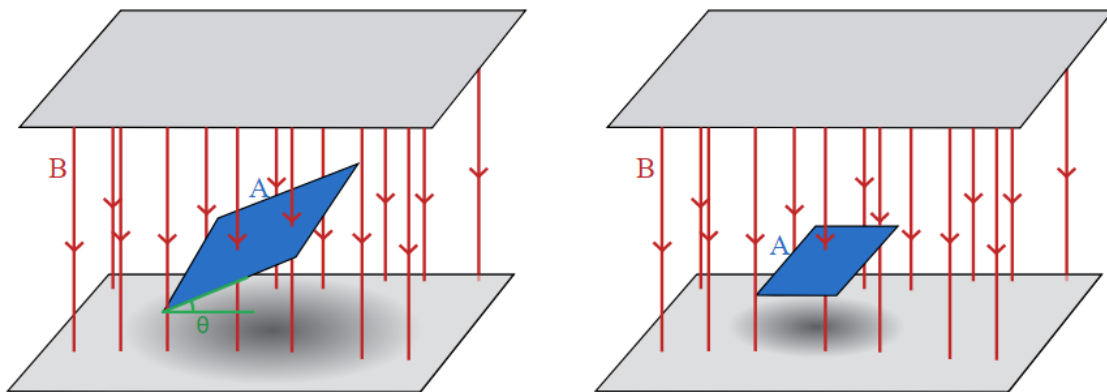
Faradays lover ble senere en sentral del av James Clark Maxwells ligninger, som la grunnlaget for elektromagnetisme, optikk og elektriske kretser. Disse differensial-formlene ble en modell for videre utvikling av elektrisk og optisk teknologi, trådløs kommunikasjon samt radar. De forklarer videre hvordan elektriske og magnetiske felt er et resultat av ladninger, strøm og flux i feltene.

Figur 6 Strøm i spole. viser en spole som er plassert i et homogent/vertikalt magnetisk felt og beveger seg vinkelrett rett for feltet. Man ser via formelen at dette er best mulige forhold.

$$E = \frac{B \times A \times \cos\theta}{dt}$$

### 9.1.2 Induksjon

Formlene viser at man kan slippe å bevege spolen langs magnetfeltet, i dette tilfelle må man bevege spolen inn og ut av feltet slik at areal som dekker feltet endrer seg. I stedet kan man rotere spolene eller feltet, dette er nærmere det som er brukt i motorer og generatorer.



Figur 7 Magnetisk flux gjennom areal, og prinsipp for elektriske maskiner. [5]

Ved maskiner vil det være flere poler og dermed flere felt. Det er også viktig å notere seg at antall viklinger i spolen også vil påvirke induisert EMF, slik Faraday-Maxwells formel viser.

$$E = -N \frac{B \times A \times \cos\theta}{dt}$$

$N = \text{Antall vindinger i spole}$

Av dette ser man de tre punktene som utgjør økt EMF og derav strøm.

$E \uparrow$  ved:

- Øke antall vindinger i spolen.

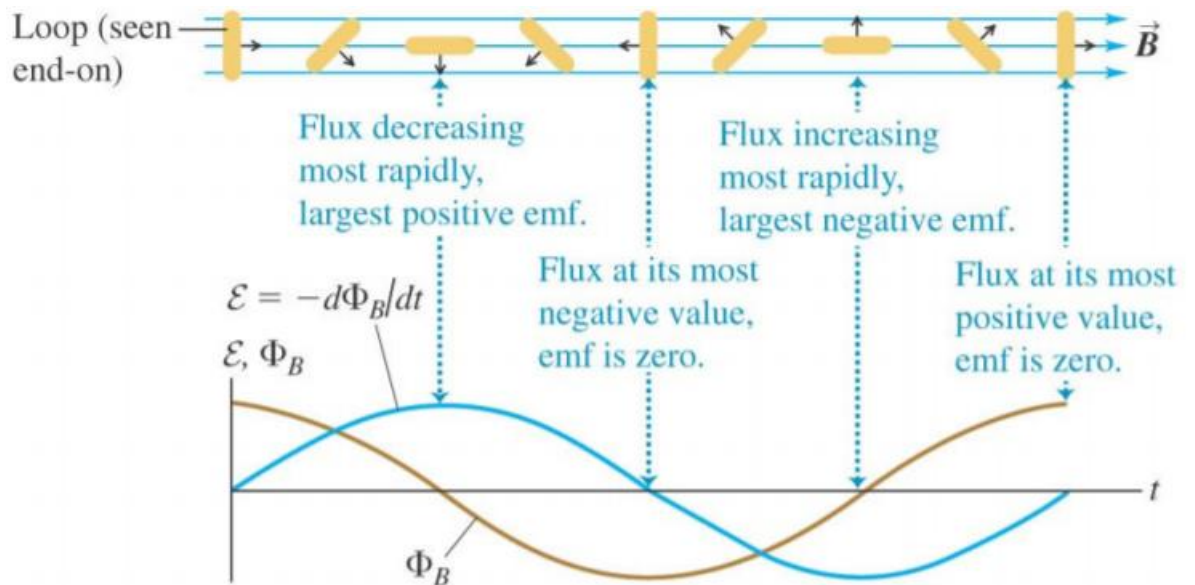
$N \uparrow$

- Øke fluxen, eller hastigheten feltet kutter spolen på.

$\phi \uparrow$

- Øke styrken på magnetfeltet.

$B \uparrow$

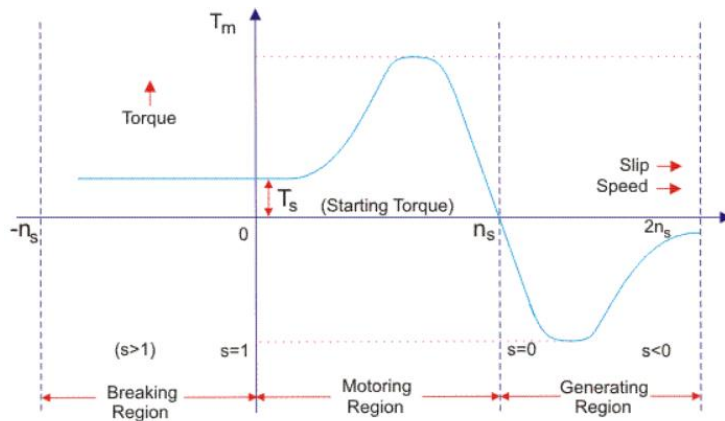


Figur 8 Forholdet mellom flux og EMF. [6]

### 9.1.3 Asynkronmotor

Asynkrone motorer består i hovedsak av 2 deler, en stator og en rotor. Statoren inneholder viklinger i par som er koblet sammen og leverer trefase strøm. Rotoren er den delen som roteres ved mekaniske krefter når den driftes som generator. Ved drift som motor er det elektriske felt som driver statoren rundt og med det omgjør elektriske krefter om til mekaniske. Forskjellen på asynkrone maskiner kontra synkrone maskiner er at asynkrone maskiner opererer med slipp. Slipp er hvor mye rotoren «henger bak» det roterende elektriske feltet. Synkrone maskiner har da en rotor som følger magnetfeltets rotasjon perfekt. Slipp beskriver også om maskinen går som motor eller generator, samt henger sammen med dreiemomentet.





Figur 9 Slip/dreiemoment kurve for asynkronmaskin [7]

I området der slip varierer fra 0 til 1 opererer maskinen som en motor. Her blir effekten levert til statorsiden, og dreiemomentet varierer fra 0 til maks i samme området. Ettersom dette forholdet er tilnærmet lineært blir utregningene forenklet.

$$T = \frac{P_{md}}{\omega_r}$$

$P_{md}$  = Mekanisk effekt produsert

$\omega_r$  = Mekanisk angulært moment for rotor

$$P_{md} = (1 - s)P_g$$

$$\omega_r = (1 - s)\omega_s$$

$$T = \frac{(1 - s)P_g}{(1 - s)\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_r}$$

$P_g$  = effekten i luftgapet mellom stator og rotor

$\omega_r$  = synkronfarten

Skal maskinen kjøre som generator må slipen være mindre en 0, altså over synkronfarten. I dette tilfellet er både slip og torque (dreiemoment) negative, som betyr at maskinen mottar mekanisk energi og leverer elektrisk. Noe som gjør at asynkrone maskiner er mindre ettertraktet som generatorer er at de krever at man har reaktiv effekt supplert fra utsiden. Dersom generatoren faller under synkronfarten blir den reaktive effekten brukt opp av maskinen, slik at det ikke blir levert videre til nettet.

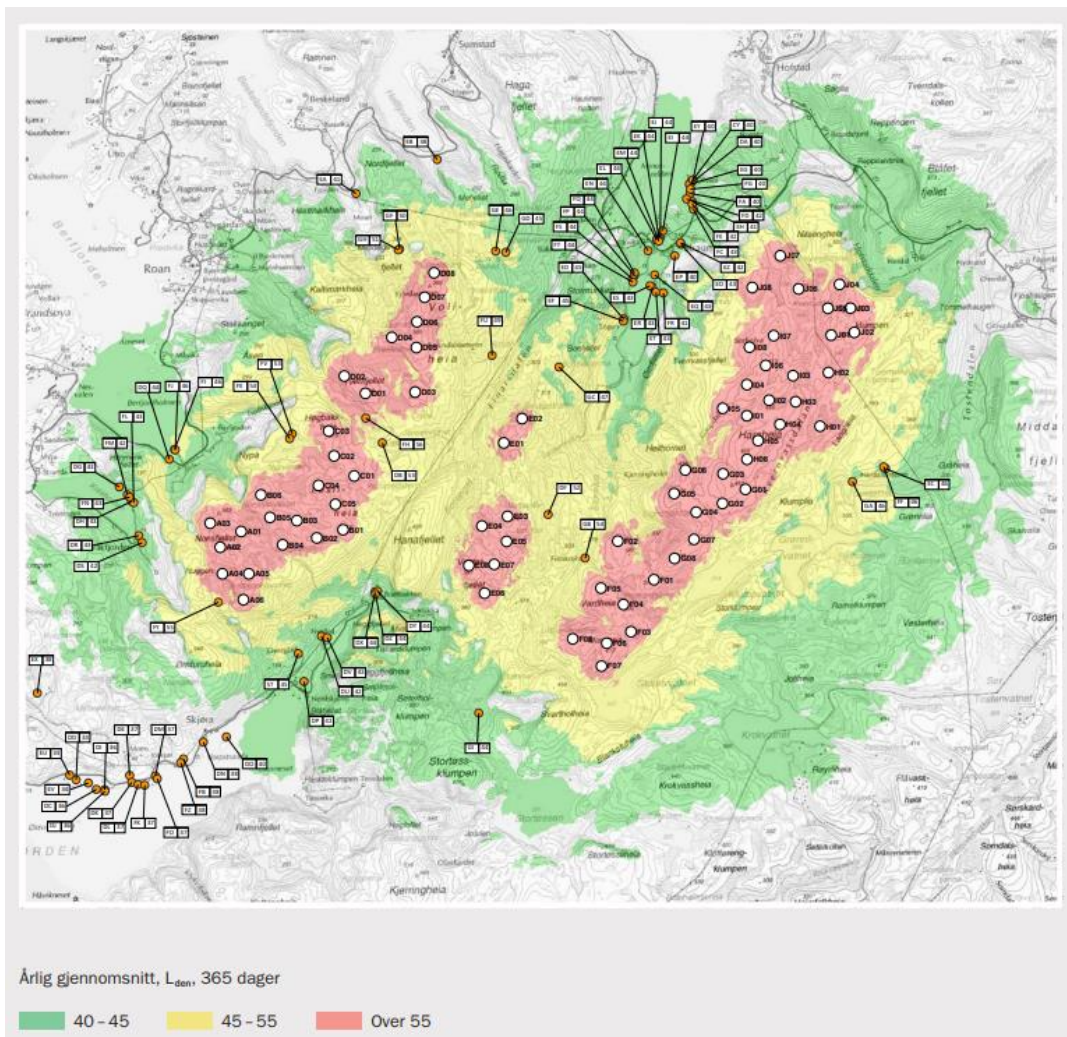
## 9.2 Vindmøllens oppbygning

Vindmøller fanger opp bevegelsesenergi i vind og gjør denne om til elektrisitet. Omformingen av energien kan skje ved hjelp av tre hovedkomponenter som er:

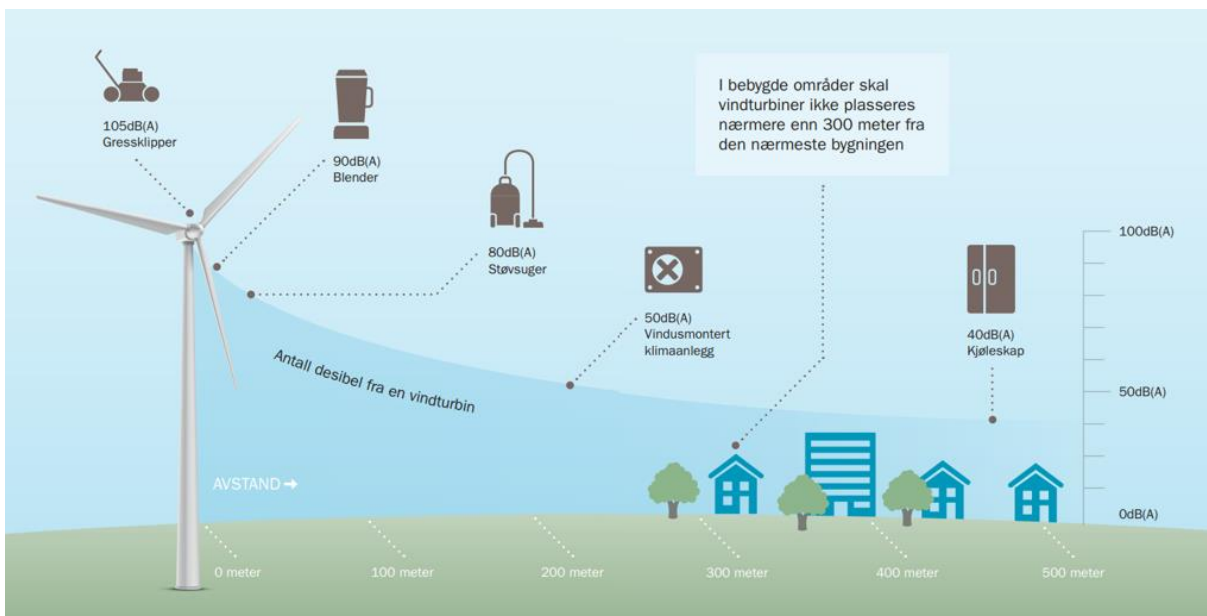
- Vinger, som er armene på vindmøllen som fanger opp bevegelsesenergien.
- Turbinen, som holder sammen leddene i vindmøllen.
- Generator, som omgjør roterende mekanisk energi til strøm.

Det er mye avansert teknologi installert i vindmøller for å gjøre dem mest mulig effektive og brukervennlige. En viktig faktor for å få gunstig strømproduksjon, er at vinden treffer vingene så rett som mulig hele tiden. Derfor er det plassert små sensorer i turbinen som konstant justerer vingenes helning og turbinens retning.

En annen viktig faktor er at vindmøllens rotasjonshastighet må begrenses. Vindmøller skaper en del støy og for å begrense dette til et nivå hvor det ikke plager de som bor i nærheten av vindmøller, dette forhindres ved å begrense rotasjonshastigheten, samt at det forsøkes på ulike støyreducerende tiltak for å begrense støy. I Norge har miljødirektoratet satt begrensinger til hvor mye støy en vindmølle kan generere. Grenseverdien i Norge er satt til  $L_{den} = 45\text{db}$ , hvor  $L_{den}$  er gjennomsnittlig støynivå. En vindmølle vil ikke operere stille om kvelden eller natten, men det legges til en «straff» på  $L_{den}$  om kvelden og natten. Fra klokken 19:00 – 23:00 er «straffen» på 5db og fra klokken 23:00 – 07:00. Dette betyr da at  $L_{den}$  grensen vil være lavere om kvelden og natten. Fra klokken 19:00 – 23:00 vil  $L_{den} = 45\text{db} - 5\text{db} = 40\text{db}$ , og med samme regnestykket vil  $L_{den} = 35\text{db}$  om natten. [8]



Figur 10 Eksempel på støykart fra [8]



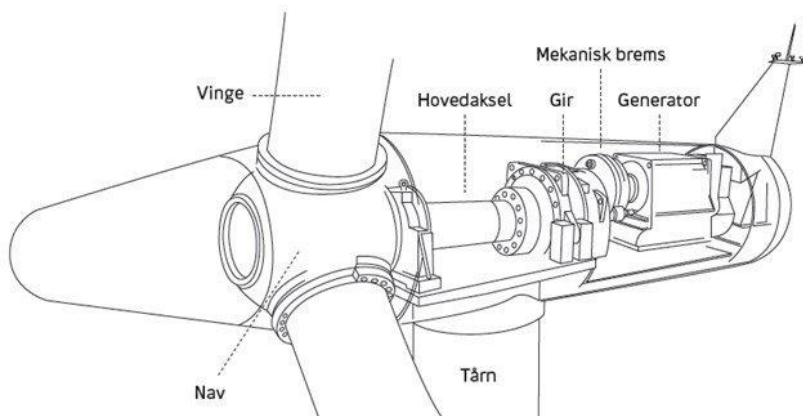
Figur 11: Illustrasjon av støynivå rundt en vindmølle [8]

For høy rotasjonshastighet kan også utgjøre en risiko hvor turbinene kan rotere så fort at det kan ødelegge turbinen. En løsning på dette er å legge inn motstand slik at vingene roterer saktere. For å sikre at turbinens rotasjonshastighet ikke synker for lavt til å produsere strøm blir det lagt inn en forsterker mellom de to leddene.

Vindmøller koster veldig mye å utvikle, samt å lage. Prisene vil variere ut ifra hvor mye de skal produsere og hvor store de er. Under er det et utvalg av forskjellige vindmøller og en estimert pris på disse, men estimatet er ikke veldig nøyaktig, fordi det å beregne pris på vindmøller er svært vanskelig da prisene er avhengig av mange faktorer og dette er heller ikke oppgavens hovedfokus.

**Tabell 1 Utvalg vindmøller med pris og generatortype**

Max levert effekt	Turbin type	Pris	Generator
55kW	Endurance E-3120	3,57 millioner	Induksjon
800kW	Enercon E53/48/44	15,7 millioner	Synkron
900kW	EWT DW61	15,7 millioner	Direct drive
1,5MW	GE 1.5sle	30,1 millioner	DFIG
2-3MW	Enercon E82	34,6 millioner	Direct drive



**Figur 12: Illustrasjon av en vindmølles oppbygning [9]**

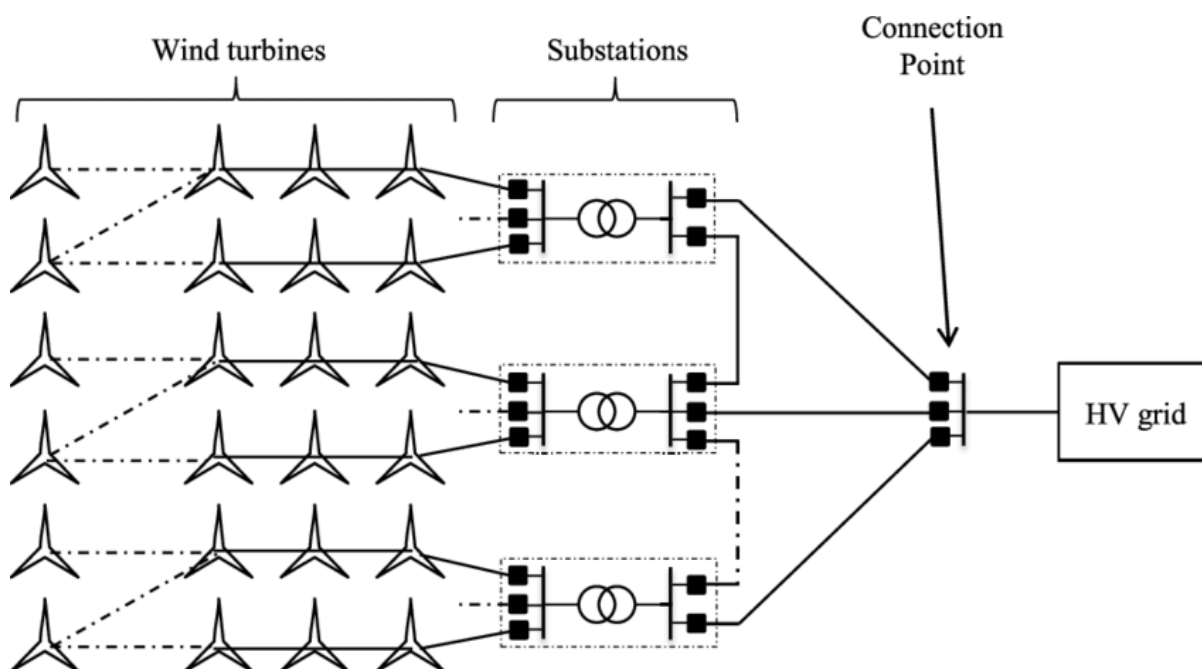
### 9.3 Vindmølleparker

Vindmøller varierer veldig i størrelse, men veldig ofte vil ikke en vindmølle utgjøre den store produksjonen av strøm, hvis den skal dekke en landsby eller by. Derfor vil vindmøller ofte bli satt opp i vindmølleparker.

En vindmøllepark vil også variere veldig i størrelse og antall vindmøller, basert på hvor stort område og husstander den skal dekke. Den største vindparken i Norge (før 2017) var Smøla vindpark. Den har 68 vindmøller installert og en årlig produksjon på 358,5 GWh [10]. Det er også noen vindparker under utvikling, hvor Fosen vindkraftprosjekt vil være det desidert største. Det er planlagt 277 vindmøller med en kapasitet på 1057 MW. Vindparken vil kunne forsyne ca.180,000 husstander med strøm og er den største investeringen i fastlandsindustri i Norge noensinne.

Hvis vi sammenlikner Norge med andre land i verden er vindparkene nokså små og vindkraftproduksjonen nokså lav. Det største landbaserte vindparkanlegget i verden er Gansu vindpark som ligger i Kina. Dette har en kapasitet på 7985 MW og er fremdeles under utvikling.

En vindmøllepark er ofte koblet i serie og videre til nettet via substasjoner og et kontaktpunkt. Dette er illustrert i figur 11.



Figur 13 Eksempel vindpark sammenkobling

## 9.4 Teori

### 9.4.1 Generelt

Dobbelmatede elektriske generatorer ligner på AC-elektriske generatorer, men har tilleggsfunksjoner som gjør det mulig for dem å kjøre med hastigheter like over, eller under, deres naturlige synkronhastighet. Dette er nyttig for store vindturbiner med variabel hastighet, ettersom at vindhastighet kan endres plutselig. Når et vindstøt treffer en vindturbin forsøker bladene å øke hastigheten, men en synkrongenerator er låst til hastigheten på strømmettet og kan derfor ikke øke hastigheten. Store krefter utvikles i navet, girkassen og generatoren som strømmettet skyver tilbake. Dette medfører slitasje og skade på mekanismen. Hvis turbinen får lov til å øke hastigheten umiddelbart når den rammes av et vindstøt, er belastningen lavere og kraften fra vindkastet omdannes til nyttig elektrisk energi.

En framgangsmåte for å tillate vindturbinens hastighet til å variere er å akseptere frekvensen generatoren produserer, konvertere det til likestrøm, og deretter konvertere den til vekselstrøm ved ønsket utgangsfrekvens ved hjelp av en omformer. Dette er vanlig for småhus og gårds vindturbiner. Men omformerne som kreves for vindturbiner i megawatt-skalaen er store og dyre.

Dobbelmatede generatorer er en løsning på dette problemet. I stedet for den vanlige feltviklingen matet med likestrøm og en armaturvikling der den genererte strømmen kommer ut, er det to trefasevindinger, en stasjonær og en roterende, begge separat forbundet med utstyr utenfor generatoren. Derav uttrykket dobbelmatet.

Dobbelmatede elektriske maskiner er i utgangspunktet elektriske maskiner som har matet AC strømmer inn i både rotor- og statorviklingene. En vikling er direkte koblet til utgangen, og produserer trefaset vekselstrøm ved ønsket gridfrekvens. Den andre viklingen (tradisjonelt kalt feltet, men her kan begge viklingene være utganger) er koblet til trefase vekselstrøm med variabel frekvens. Denne inngangseffekten justeres i frekvens og fase for å kompensere for endringer i hastigheten til turbinen. Justering av frekvens og fase krever en AC til DC til AC-omformer. Dette er vanligvis laget av meget store IGBT halvledere. Omformeren er toveis, og kan passere strøm i begge retninger. Strøm kan strømme fra denne viklingen så vel som fra utgangsviklingen.

De fleste dobbelmate elektriske maskinene i industrien i dag er trefase viklet-rotor induksjons maskiner. Selv om prinsippet om hvordan de opererer har vært kjent i noen tiår, er det først nå nylig at dobbelmatet elektriske maskiner har gått over til vanlig bruk. Dette skyldes nesten utelukkende utviklingen av vindkraft teknologi for generering av elektrisitet. DFIG er uten tvil den mest brukte

typen av dobbelmatelede elektriske maskiner, og er en av de mest vanlige type generator brukt til å produsere elektrisitet i vindturbiner. [2]

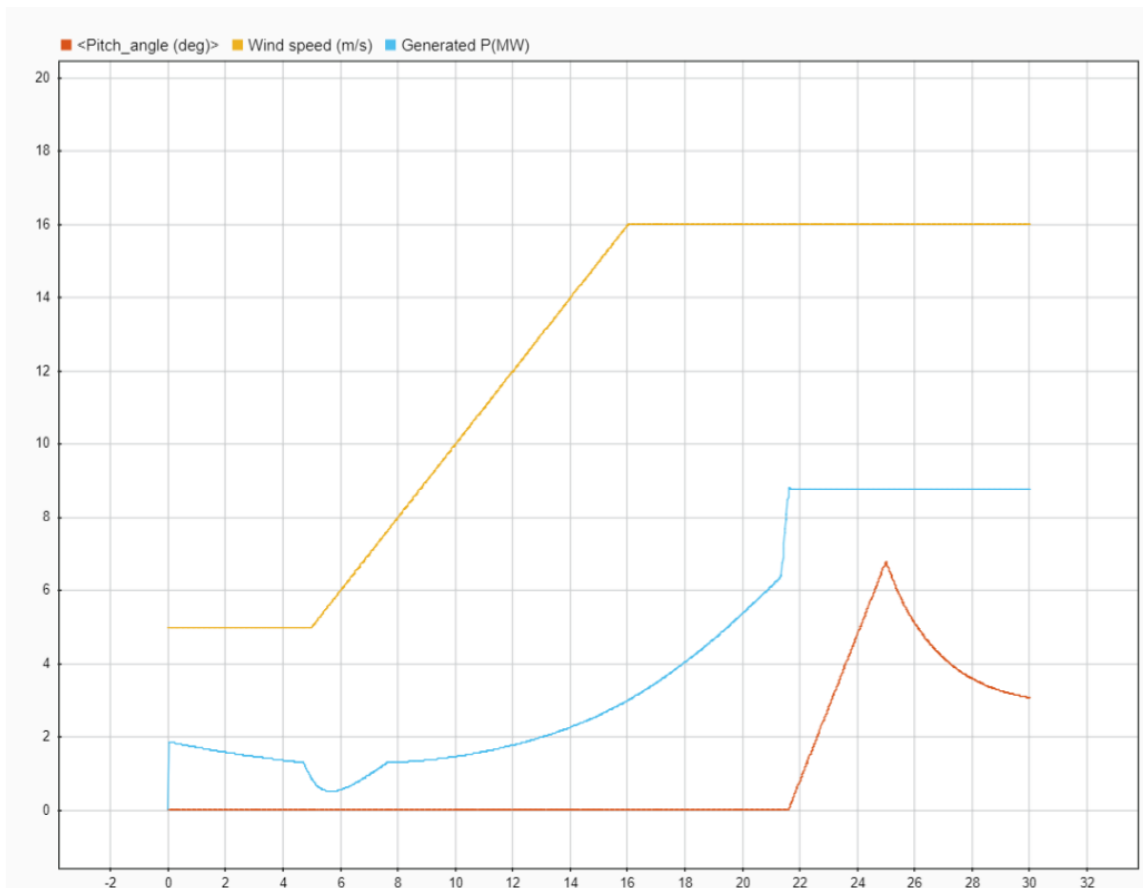
Børsteløs dobbelmatet maskin (BDFM) viser et kommersiell potensiale som både en variabel hastighetsdrive og generator. Som en generator er det spesielt attraktivt for vindkraftproduksjon som erstatning for dobbelmatelede slip-ringgeneratorer. En vindturbin som inneholder en BDFM, vil ha høyere pålitelighet og lavere vedlikeholdskostnader på grunn av fravær av børsteutstyr. Undersøkelser har vist at problemer med børstehjul er et viktig problem i vinturbinoperasjonen når det gjelder påliteligheten. Problemet vil bli mer alvorlig i maskiner som benyttes offshore der det er sterkere vind og tilgjengeligheten er svekket. I tillegg gir BDFM en nøkkelfordel som en variabel hastighetsdrive ved at den bare krever en omformer. [11]

#### 9.4.2 Matlab/Simulink simuleringer

Matlab/simulink har ferdige programmer som skal simulere ulike elektriske systemer og komponenter. En av disse programmene skal simulere en vindpark som benytter DFIG. Dette systemet hadde opprinnelig bare en «step» funksjon for vindhastigheten, men etter litt modifikasjon kunne man simulere ulike scenarier, som f.eks. et fall i vindhastighet. Det opprinnelige systemet kommer fra Simscape Electrical. Generatorene i denne simuleringen er i 1.5MW skalaen, og hele parken leverer 9MW totalt. Turbinen i simuleringene er ment for vindhastigheter på 12 m/s, dette er i lavere del av nytteområdet.

I første simulering har vi en lav starthastighet på vinden, som deretter får en stor økning. Det som er interessant her er hvordan den genererte effekten reagerer på endringene. I det vinden øker går generert effekt ned, som ikke virker intuitivt. Dette er for at generatoren ikke skal skade systemet eller nettet. Etter at stigningen er kjent øker produsert effekt mot maks, i dette tilfellet 9MW. Når vinden har stabilisert seg på 16m/s vil bladene på turbinen slå inn slik at generatoren får et sprang. Når levert effekt har omsider nådd 9MW vil bladene omstille seg igjen slik at den holder seg på 9MW.

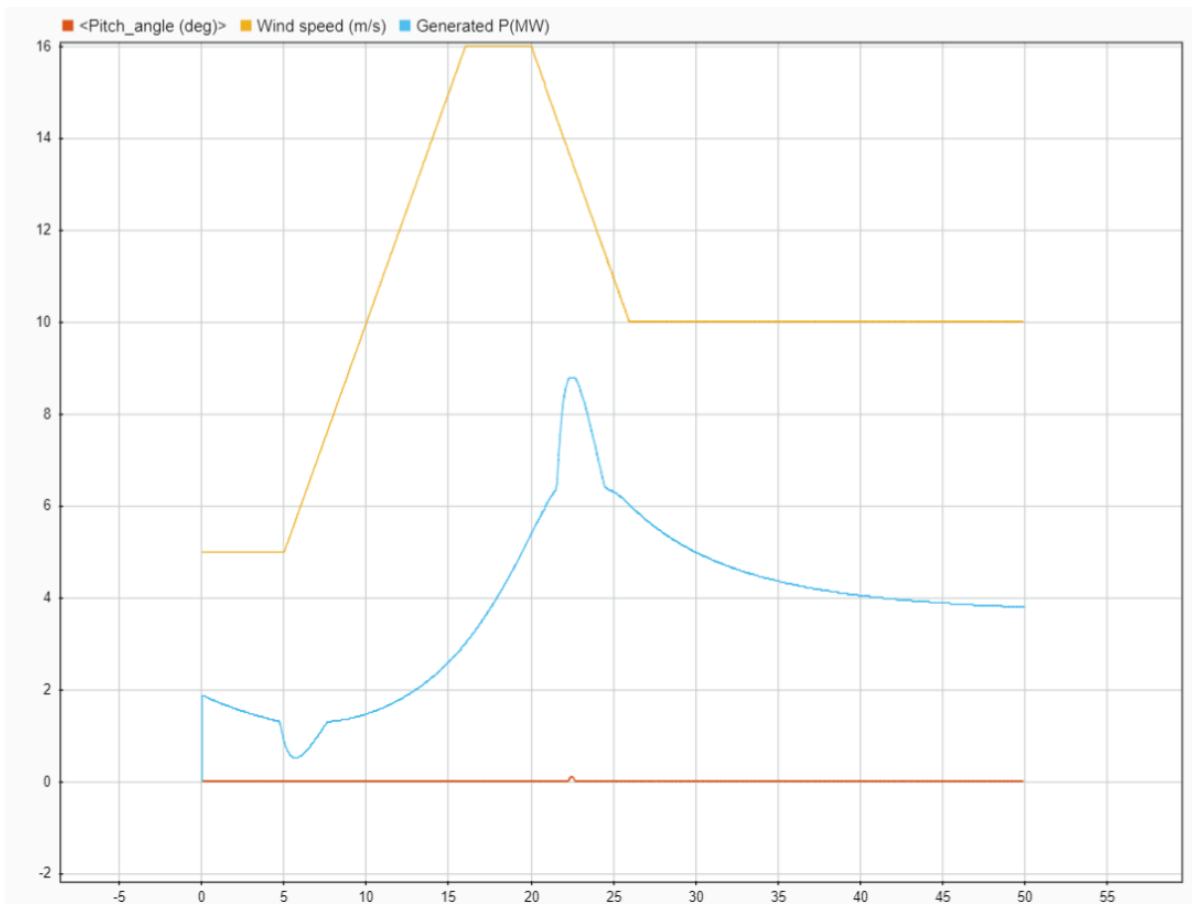




**Figur 14 Simulering 1**

I neste scenario ble det simulert et vindkast etterfulgt at en stabilisering på et litt lavere nivå. Her ser man samme dynamiske respons som i første simulering da generert effekt «daler» i det det oppfatter vindkastet. Når vinden har nådd makshastighet vil vinkelen på bladene justeres igjen og få 9MW levert. I det vinden avtar vil generert effekt øke, før vind og generert effekt stabiliserer seg. Her er det ikke behov for merkverdig tilrettelegging for bladene, der man ser at vinkel-reguleringen så vidt slår inn.

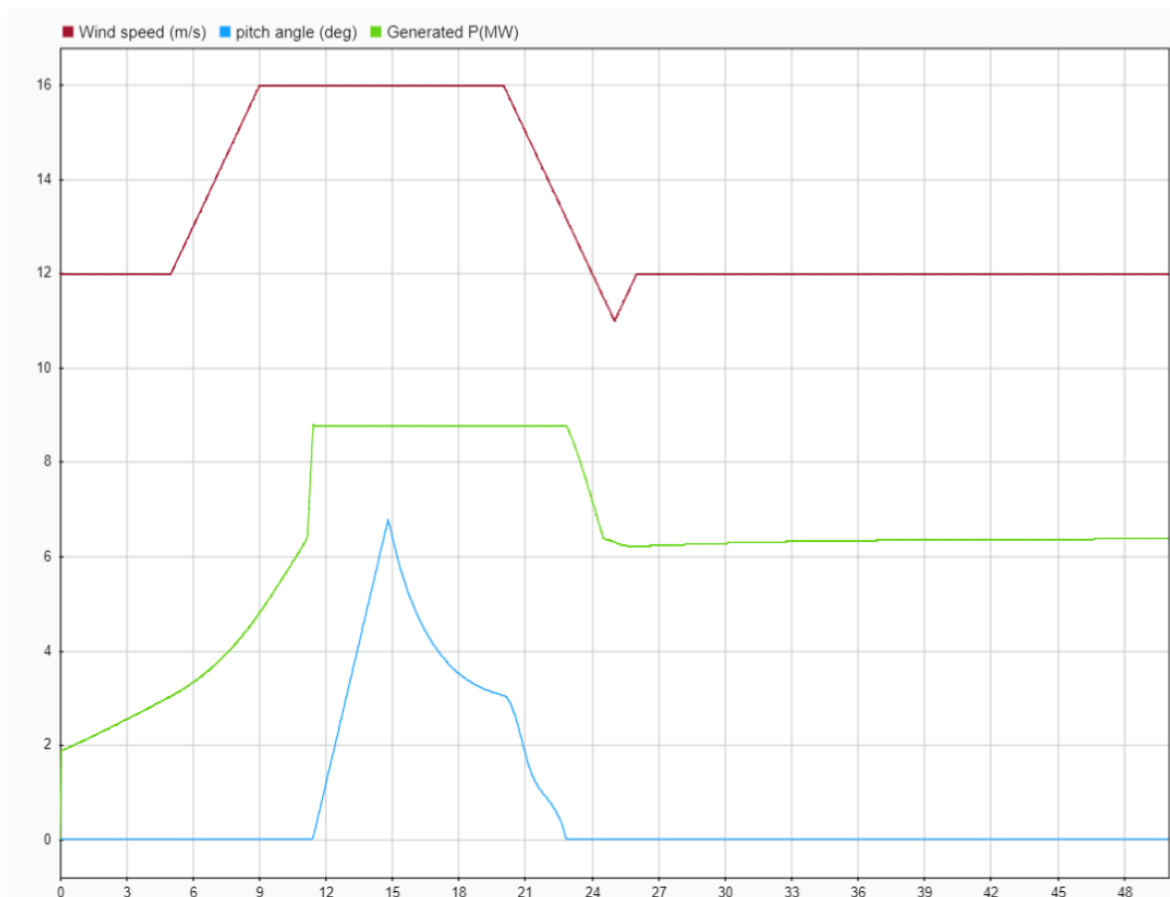




**Figur 15 Simulering 2**

I disse simuleringene blir det simulert scenarier som ikke er reelle, dette med vindhastigheter på 5-8 m/s. Bakgrunnen for disse simuleringene er ikke å simulere en vindpark, men å øke forståelsen for virkemåten og oppførselen til DFIG under ulike omstendigheter.

Simulering 3 var en av simuleringene som var mest reell, ettersom at vindhastigheten ikke oscilerte i alt for stor grad. En hastighet på omkring 12m/s er vanlig langs kyst og andre utsatte områder. Her ser man at bladene justeres i det DFIG leverer maksimal effekt. Ved t=23 ble det lagt inn et lite fall i vindhastigheten, her ser man at DFIG gjør opp for dette ved å justere bladene litt. Generert effekt merker ikke dette fallet betraktelig ettersom at den kurven er mye mykere.



Figur 16 Simulering 3

Deretter ble det simulert to vindkast for å se hvordan generert effekt og bladene responderte. Bladene justerer det mekaniske pådraget til girene, og i denne situasjonen ser man at det justeres for å minske pådraget ettersom at DFIG allerede produserer 9MW. Effekten faller ikke før bladene justeres, selv om vindhastigheten faller i området  $t = [25, 29]$ .



**Figur 17 Simulering 4**

Til slutt ble det utført en mer reell simulering der vinden varierer rundt 14 m/s. Dette er det man kan forvente fra en faktisk vindpark. Det er klart at vinden ikke vil ha slike brå endringer i lengre perioder, men dette er en tilstrekkelig tilnærming. Utfra grafen ser man at bladene er mest sensitiv til vindhastigheter over 15 m/s, det er også tydelig at vinkelen på bladene og vindhastigheten ikke er proporsjonale. Den største vinkelen er nesten 3 ganger større en den nest største, selv om differansen på vindhastigheten bare er 1m/s. Vindhastighet har naturlig nok betraktelig stor innvirkning på hvor mye elektrisk effekt man får ut av generatoren. Ser man på formelen for

effekten i vind ser man at hastighetsleddet er i 3-potens. Dette vil ha ringvirkninger innover i systemet som på et tidspunkt endrer vinkelen på bladene.

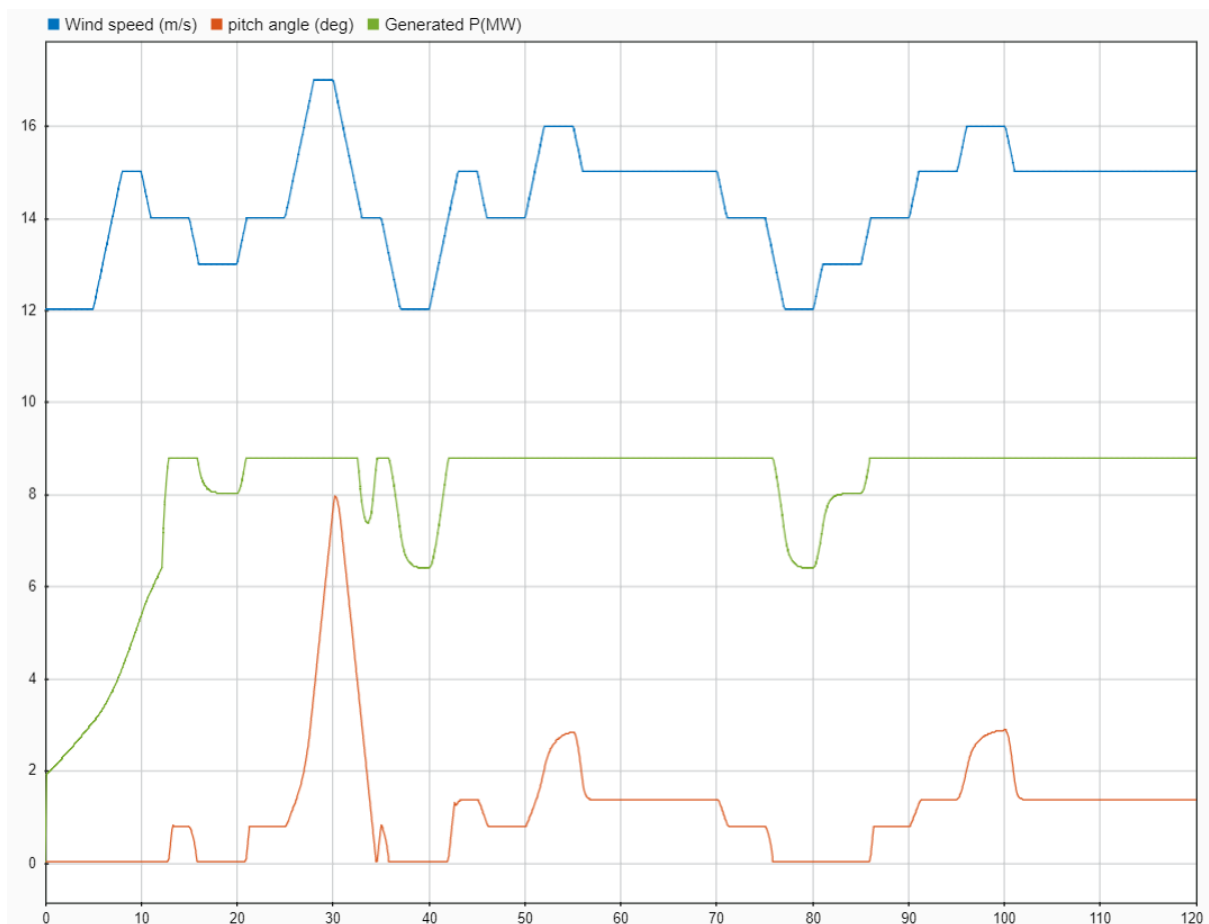
$$P_v = \frac{1}{2} * A * \rho * v^3$$

$P_v =$  Effekten i vinden

$A =$  Areal som vinden treffer

$\rho =$  Tettheten på vind, ofte satt som konstant

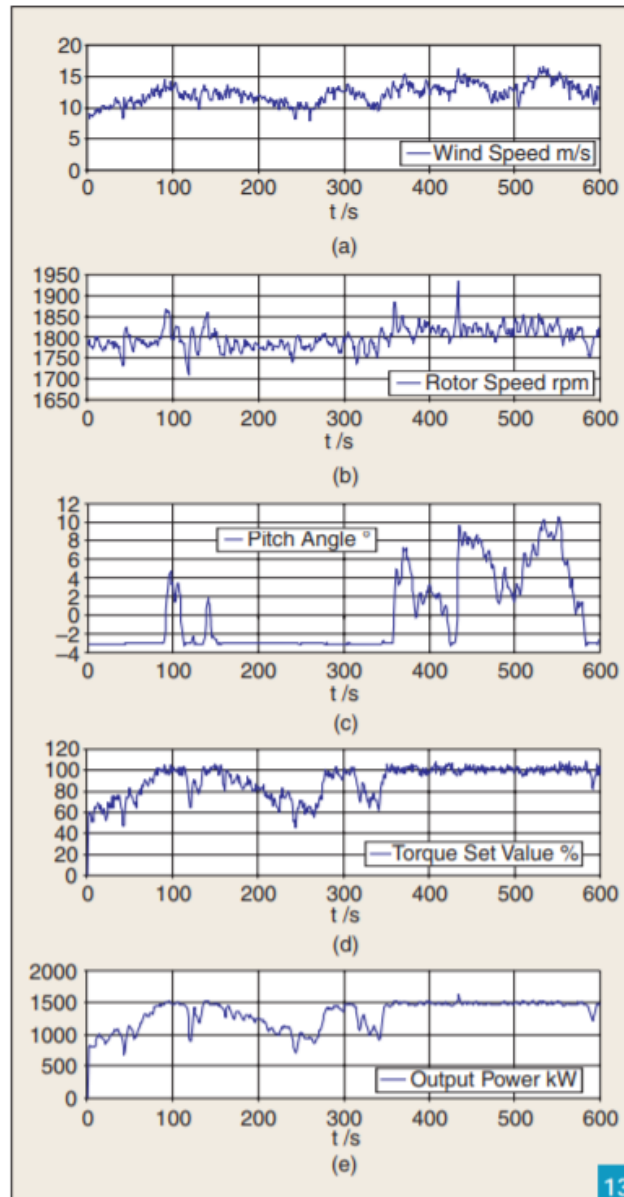
$v =$  Vindhastighet



**Figur 18 Simulering 5, mer reell simulering**

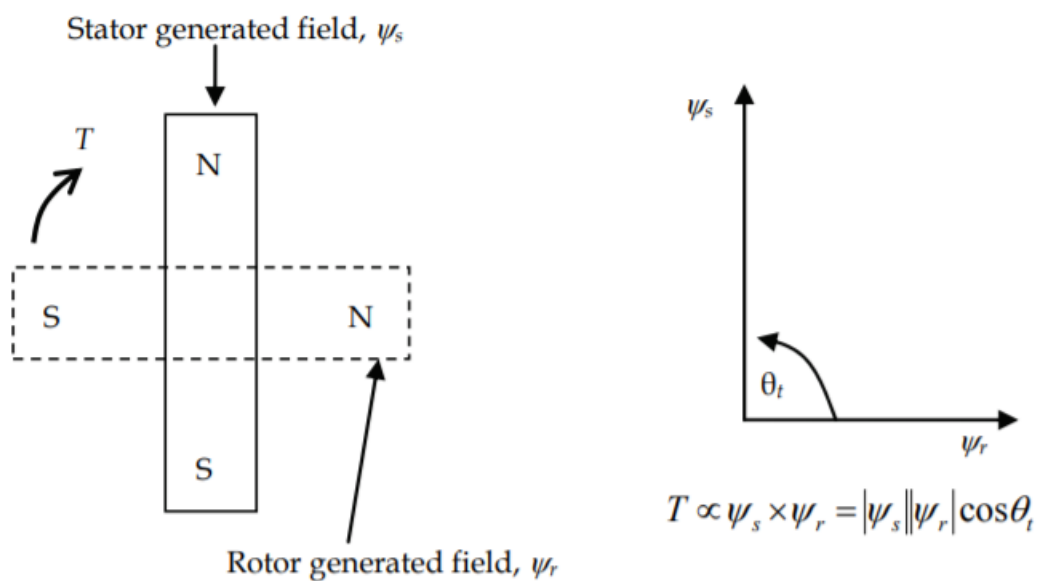
Disse simuleringene samsvarer greit med av kildene som har vært brukt i oppgaven. [12] Dataen fra denne rapporten gir tilnærmet lik data som simuleringene i denne oppgaven. Ser man på tallene på «pitch angle» og «wind speed» ser man samme sammenheng. Noe Simulink ikke hadde var tall for

dreiemoment, eller torque, som lett kunne måles, men ettersom at flere variabler samsvarer kan man anta at resten også gjør. Deler av gruppen som utførte disse simuleringene er medlemmer av IEEE.



Figur 19 Data fra simulering av DFIG

## 9.5 Steady-State operasjon av DFIG



Figur 20: To magneter som står normalt på hverandre

I en induksjonsmaskin defineres slip som:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

$n_s$  er synkronhastighet

$n_r$  rotorens mekaniske hastighet.

Den synkrone hastigheten er gitt av:

$$n_s = \frac{60 f_e}{p} \text{ rpm}$$

$p$  antall polepar

$f_e$  elektriske frekvensen av den påførte statorspenningen.

Gitt at rotorkrets er satt til å være åpen, og rotoren er låst (stillstand). Når statoreksiteringen er påført vil en spenning bli generert ved utgangsterminalene på rotorkretsen,  $V_r$ . Hvis rotoren blir justert til å gå gradvis raskere i subsynkron modus, så vil frekvensen på rotorens utgangsterminaler avta når rotoren akselererer mot synkronhastighet. Ved synkronhastighet vil rotorfrekvensen være null. Når rotoren akselererer utover synkronhastigheten (supersynkron modus) vil frekvensen av rotorspenningen begynner å øke igjen, men den vil ha motsatte fasesekvens i forhold til den subsynkrone modusen. Derfor er frekvensen til rotorspenningen

$$f_r = sf_e$$

Ingen rotorstrømmer kan flyte med rotorens åpne krets, og det vil derfor ikke være produksjon av dreiemoment da det ikke finnes rotorfelt  $\Psi_r$ . Hvis rotoren er kortsluttet eksternt, hvor rotorstrømmene kan flyte, vil de flyte med frekvensen  $f_r = sf_e$ . Rotorstrømmene produserer et rotormagnetfelt,  $\Psi_r$ , som roterer med samme mekaniske hastighet som statorfeltet,  $\Psi_s$ . De to feltene interagerer for å produsere dreiemoment. Både rotormagnetfeltet og statormagnetfelte roterer ved synkronhastighet. Rotoren kan dreie asynkront, men rotorfeltet roterer med samme hastighet som statorfeltet.

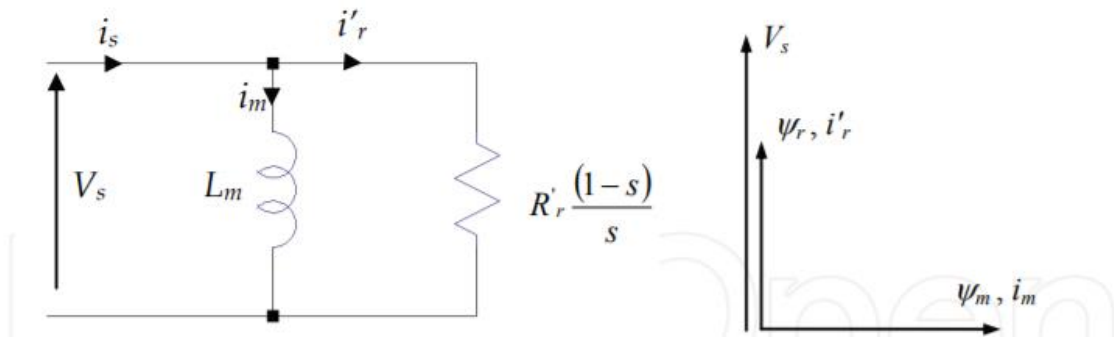
Det mekaniske dreiemomentet som genereres av maskinen, er funnet ved å beregne effekten absorbert (eller generert) av rotormotstandskomponenten  $R_r \frac{(1-s)}{s}$ . Dette er vist til å være

$$P_{mek} = 3 |i_r|^2 \left( \frac{1-s}{s} \right) R_r$$

I en ideell induksjonsmaskin kan vi ignorere rotor- og statorfase viklingsmotstanden og lekkasjeinduktans.

Per-fase ekvivalent krets er vist i figuren nedenfor.

Den statorgenererte flukskomponenten er normal på rotorstrømmen (d.v.s. rotorfluks)



Forenklet ekvivalent krets av induksjonsmaskinen er under antagelse av lave verdier av slip og ubetydelig stator- og rotorlekkasje – reaktans. Viserdiagrammet viser optimal orientering av magnetiseringsstrøm og rotorstrøm. Dreiemomentproduksjon (dette gjelder bare for lave verdier av slip). Ved hjelp av dette forenklete kretsdiagrammet er det mekaniske dreiemomentproduksjonen:

$$T_{mek} = 3 |i'_r|^2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \frac{R'_r}{\omega_m}$$

$$\omega_m = \frac{(1-s)\omega_s}{p}, \quad \Psi_m = L_m i_m = \frac{V_s}{\omega_s} = \frac{|i'_r| R'_r}{s\omega_s}$$

Som gir:

$$T_{mek} = 3 |i'_r|^2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \frac{R'_r}{\omega_m} = 3p \frac{|i'_r| R'_r}{s\omega_s} |i'_r| = 3p \Psi_m |i'_r|$$

Nøkkelpunktet i denne utviklingen er å vise at det utviklede dreiemomentet styres av en kombinasjon av statorgenerert fluks  $\Psi_m$ , og rotorens strømstyrke  $i'_r$ , hvis de to vektorene opprettholdes i kvadratur. I DFIG-systemet styres dreiemomentet av beregning av den fysiske posisjonen og størrelsen til den statorgenererte fluksen (ved å overvåke posisjonen og størrelsen på den påførte statorspenningen som i dette tilfellet er pålagt av nettets spenningsstørrelse, frekvens og fase) og regulering av rotorstrømmene slik at de er normale for statorfluksen med en størrelse som vil generere ønsket dreiemoment. DFIG-systemet må derfor kontrollere størrelsen, frekvensen og fasen av den påførte rotorstrømmen. De fleste DFIG-systemer utnytter nåværende strømkontroll med lukket sløyfe ved hjelp av en spenningskilde inverter (VSI). På dette stadiet kan spenningskildeomformerens betraktes som en trefasespenningskilde hvis størrelsen og fasen kan endres øyeblikkelig. Derfor kan VSI brukes til å regulere rotorstrømmen. For å kunne ordentlig



plassere rotorens nåværende kunnskap om rotorens fysiske posisjon kreves, for eksempel, bruk av en mekanisk posisjonssensor. På en slik måte kan rotorstrømmen (dermed fluks) være orientert optimalt med hensyn til statorfluksen for å generere ønsket dreiemoment. [1]

## 9.6 DFIG rolle i dag

De aller fleste dobbelmattede asynkronmaskinene vi finner i dag er generatorer. DFIG er oftest sett i vindmøller, ettersom at de har flere fordeler sett opp mot vanlige asynkronmaskiner eller synkronmaskiner. Som beskrevet tidligere gjør en DFIG at man kan forvente en stabil amplitude og frekvens på trefase spenningen man får ut, de er mindre avhengig av rotor-/vindhastigheten enn tradisjonelle synkrongeneratorer. Man kan derfor koble DFIG direkte på AC-nettet og forvente at det holdes synkront. Forholdet mellom turtall på stator og rotor for de forskjellige maskinene kan bli sett i formlene under. [Standard asynkron generator]

$$f' = n * N_p$$

$f'$  = frekvensen i strømmen over stator [Hz]

$n$  = Rotorhastighet [r/min]

$N$  = Poler per fase

Dette medfører at rotorhastigheten er synkron med generatorens synkronhastighet. Som betyr at vindkast og oscilleringer i vindstyrken påfører systemet ekstra torque, som går utover levetiden. Girene er spesielt utsatt for slitasje med tanke på at de må motvirke denne plutselige økningen i torque.

I dobbeltmattede asynkronmaskiner er formelen litt annerledes.

$$f' = n * N_p + f$$

$f'$  = Frekvensen på trefase spenningen over rotoren [Hz]

Frekvensen på stator spenningen er proporsjonal med hastigheten på det roterende magnetfeltet på stator. Rotasjonsfarten av magnetfeltet er avhengig av rotorhastigheten og frekvensen på vekselstrømmen som blir matet til rotoren.

Hovedgrunnen for å bruke DFIG er for å produsere trefase spenning der frekvensen på statorspenning er konstant. Det vil si der frekvensen holder seg synkront med frekvensen på nettet

der generatoren supplerer. Dette spenningsnivået må holde seg stabilt selv med endringer i rotorhastighet som er forårsaket av endringer i mekanisk kraft tilført generatoren, type kraftige vindkast. Frekvensen på rotorstrømmen som må bli matet inn i DFIG'ens rotor for å opprettholde generatorens utgangsfrekvens på samme nivå som frekvensen på nettet den er koblet til, er avhengig av hastigheten rotoren. Dette er lettere visualisert i formlene under.

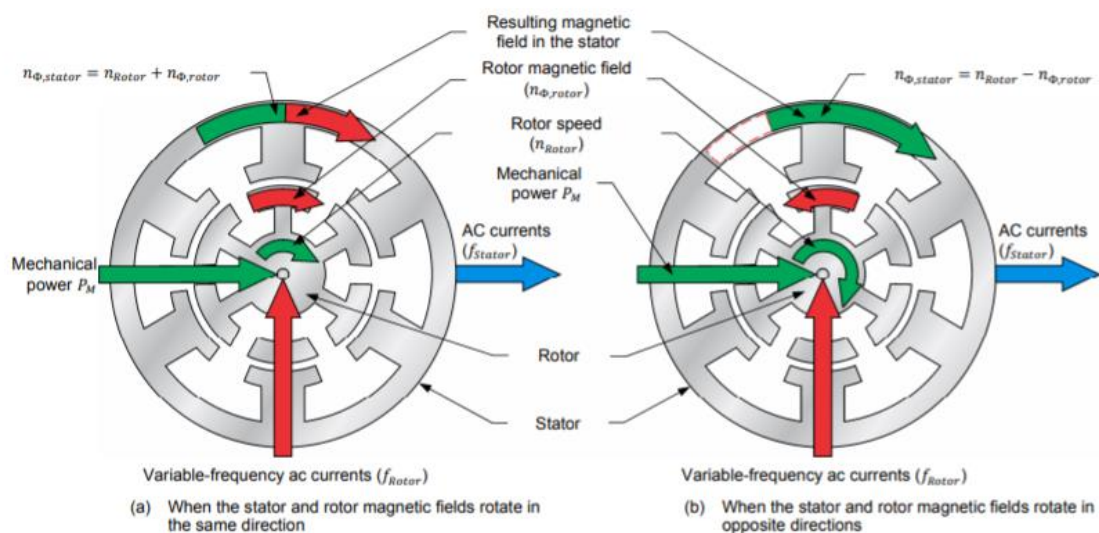
$$f' = f'' - n * N_p / 120$$

$$f' = \text{Frekvensen på vekselstrømmen ved rotor [Hz]}$$

$$f'' = \text{Frekvensen på vekselstrøm nettet som generatoren supplerer [Hz]}$$

$$n = \text{Turtall [r/min]}$$

$$N_p = \text{Antall poler per fase}$$



Figur 21: Figuren viser interaksjonen mellom turtall og frekvensen av magnetfeltet. [2]

En DFIG vil ha følgende fordeler sammenliknet med en vanlig asynkrongenerator i vindmøller:

1. Amplituden og frekvensen til spenningen vil holde seg konstant ved varierende vind.
2. Mengden strøm generert som en funksjon av vindkraft er optimalisert
3. Plutselige variasjoner i rotor momentet og generator output er nesten eliminert
4. Vindmøllen produserer strøm selv på lave turtall
5. Det er lettere å kontrollere kraftfaktoren.

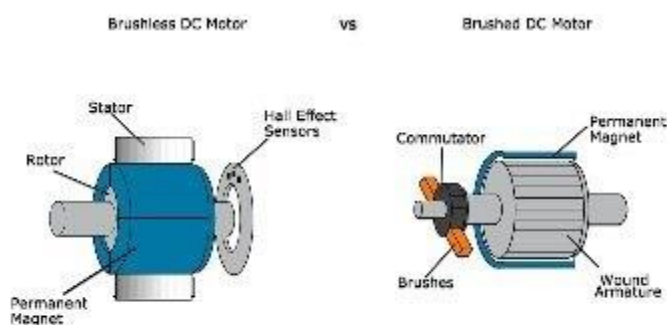
## 9.7 DFIG slipring kontra børsteløse

Det som skiller en motor med børster fra en børsteløs motor er hovedsakelig at den genererer strøm ved at et sett med kontaktpunkter på rotoren skaper kontakt med børstene. Strømmen blir deretter koblet på en rotorspole med forbindelse til en stasjonær magnet.

Ettersom det er en fysisk kontakt mellom børstene og kontaktpunktene så skapes det en friksjon mellom de bevegelige delene. Friksjonen gjør at det vil være et tap av energi i form av varme. Fordelene med børsteløs motor, hvor børstene er erstattet med elektronikk, er fraværet av friksjon. Dette medfører at motoren kjører med en jevnere rotasjonshastighet, og at motoren kan kjøre med en høyere hastighet uten risiko for høye temperaturer eller innvendige ødeleggelser. Børsteløse motorer er også mer stillegående, kompakte, og tar mindre plass. Det er mindre slitasje på utstyr, og en børsteløs maskin har to til tre ganger lenger forventet levetid sammenlignet med en motor med børster.

Ulempene med børsteløse motorer er at det kreves mer avanserte komponenter for å drive motoren. Dette gjør også at programvaren som kreves for å drifte maskinen blir mer avansert. Ved at motoren er mer avansert øker kostnadene for å produsere motoren. Børsteløse motorer er også sensitiv for påvirkning av utenomliggende magnetfelt som vil kunne påvirke statorfeltet i motoren. Dette kan føre til feil eller lavere rotasjonshastighet. “

“



Figur 22: Figuren viser en børsteløs motor og en med børster

## 10 Diskusjon

Oppgaven har bydd på visse utfordringer og arbeidet med oppgaven kom også sent i gang grunnet sent valg av oppgaven. Oppgavens opprinnelige krav var dessverre ikke mulig å gjennomføre, fordi det ikke lot seg gjøre å bygge en testbenk. En DFIG er relativt stor i størrelsen og skolen hadde dessverre ikke slike motorer som vi kunne bruke til testing. Det var heller ikke noen i Bergen som hadde noen tilgjengelig. Derfor ble oppgaven endret i samråd med veileder og fokuset ble deretter en teoretisk tilnærming til oppgaven, vinklet mot vind-industrien.

Vi har fått gjennomført noen virtuelle tester ved hjelp av Matlab/Simulink som fungerer som en illustrasjon av hvordan en DFIG oppfører seg ved forskjellige scenarier. Dette ble da en løsning på å få gjennomført en «testbenk». Sett bort ifra dette har prosjektet og planen blitt gjennomført relativt smertefritt.

## 11 Metode

Vår løsning på oppgaven omhandlet i stor hovedsak datainnsamling og teoretisk arbeid. Når skolen ikke hadde en DFIG tilgjengelig til å gjennomføre en praktisk tester, ble oppgaven endret til å fokusere på teorien bak hvordan en DFIG fungerer og hvilke fordeler og ulemper denne innebærer.

Kildebruken i oppgaven er i all hovedsak basert på nettsøk, hvor det deretter ble sortert ut ifra hvilke kilder som er akademiske og kilder som er i ulike nettforum. Kilder som nettforum o.l har vi ikke brukt pga det ikke står oppført hvor folk har hentet informasjonen ifra. Søkemotoren vi har brukt er Google og Google Scholar.

## 12 Konklusjon

I denne oppgaven ble det gjennomført et litteratursøk og sammenligning av DFIG, kartlegging av «state of the art» med en matematisk modell, samt en simulering av en vindpark som benytter DFIG som er utsatt for ulike vindscenarier.

DFIG oppdager vindkast og forbereder seg ved å regulere vinklene vinden treffer bladene på, som reduserer eller øker pådraget. Dette medfører mindre slitasje på systemet som igjen er økonomisk gunstig hvis vi sammenligner med en vanlig asynkronmaskin. DFIG oppfører seg mer harmonisk og kan operere i et større vindspekter, hvor en vanlig SFIG må bremse dersom turtallet havner utenfor et mer begrenset område.

Videre arbeid med denne oppgaven burde inneholde simuleringer med flere forskjellige generatorer, men med samme linje- og transformator-parametere. En testbenk burde gjennomføres der pådraget kan varieres etter behov. Nærmere undersøkelse på den økonomiske delen er også nødvendig for en tyngre begrunnelse og anbefaling.

## 13 Referanser

- [1] D. J. F. a. J. Yang, «Introduction to Doubly-Fed Induction Generator,» 2010. [Internett]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/6450/7716115927e70c19fb1b35c0990f32b7d6dd.pdf?fbclid=IwAR1BnK3hB7iMN7-H2npddupc1oo2KWErZKkr8vyF-wnv-zkMLVHs2WzjXk4>. [Funnet Mars 2019].
- [2] Lab-Volt Ltd, «RENEWABLE ENERGY Principles of doubly-fed induction generators,» Mai 2011. [Internett]. Available: [http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/rep1/doubly-fed\\_induction\\_generators.pdf](http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/rep1/doubly-fed_induction_generators.pdf).
- [3] A. Faizan, «Induction Generator: Types & Working Principle | Permanent Magnet Generator Working Principle,» Eletrical Academia, [Internett]. Available: <http://electricalacademia.com/induction-motor/induction-generator-types-working-principle-permanent-magnet-generator-working-principle/>. [Funnet April 2019].
- [4] Khan Academy, «Khan Academy,» Khan Academy, 2019. [Internett]. Available: <https://www.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-faradays-law>. [Funnet 25 April 2019].
- [5] Khan Academy, «Khan Academy,» 2019. [Internett]. Available: <https://www.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-magnetic-flux>.
- [6] University of Central Florida, «UFC Physics,» [Internett]. Available: [https://physics.ucf.edu/~roldan/classes/Chap29\\_PHY2049.pdf](https://physics.ucf.edu/~roldan/classes/Chap29_PHY2049.pdf). [Funnet 26 April 2019].
- [7] electrical4u, «electrical4u,» [Internett]. Available: <https://www.electrical4u.com/torque-slip-characteristics-of-induction-motor/>. [Funnet 16 Mai 2019].
- [8] Fosen Vind, «Støy og Vindkraft,» 2019. [Internett]. Available: <https://www.fosenvind.no/globalassets/fosen-vind/main-images/stoy-og-vindkraftverk---brosjyre-a4.pdf>. [Funnet April 2019].
- [9] US Department of Energy, «The inside of a Wind Turbine,» April 2019. [Internett]. Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine>.
- [10] Norwea, «Vindkraft i Norge,» 2019. [Internett]. Available: <https://www.vindportalen.no/Vindportalen-informasjonsiden-om-vindkraft/Vindkraft/Vindkraft-i-Norge>. [Funnet 11 Mai 2019].
- [11] E. Abdi, X. Wang, S. Shao, R. A. McMahon og P. Tavner, «IEEE Xplore,» 24 Okt 2008. [Internett]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4658864>.

[12 S. Müller, M. Deicke og R. W. De Doncker. [Internett]. Available:  
] <http://web.mit.edu/kirtley/binlustuff/literature/wind%20turbine%20sys/DFIGinWindTurbine.pdf>. [Funnet 4 Mai 2019].

[13 Strøm.no, «Vindmøller: Slik lager de strøm,» April 2019. [Internett]. Available: <https://xn--strm-ira.no/vindm%C3%B8ller-slik-lager-de-str%C3%B8m>.

## Appendiks A      Forkortelser og ordforklaringer

Under står forkortelser som er brukt i rapporten.

*Tabell 2: Forkortelser og ordforklaringer*

DFIG	Doubly Fed Induction Generator
SFIG	Single Fed Induction Generator
PMSG	Permanent Magnet Synchron Generator
HVL	Høgskolen på Vestlandet
rpm	Rotasjoner per minutt
EMF	Elektromagnetisk felt
BDFM	Børsteløs dobbelmatet maskin



## Appendiks B          Prosjektledelse og styring

### B.1                  Prosjektorganisasjon

I oppgaven dukket det opp utfordringer underveis som gjorde at arbeidet med selve rapportskrivningen ble forsinket. Arbeidet ble fordelt fortløpende ettersom arbeid dukket opp. Vi har møttes ca. 1-4 ganger per uke avhengig av hvor mye arbeid som måtte gjennomføres. De dagene vi møttes gikk vi også igjennom hva som hadde blitt gjort siden sist gang, og dersom en i gruppen var ferdig med arbeidet, fordelte gruppen ut nye arbeidsoppgaver. Ellers har vi også hatt kontakt daglig og jobbet individuelt hver for oss.

Veiledning har vi i snitt hatt hver 3 uke, hvor det har blitt rådført med veileder angående utfordringer som har dukket opp underveis og om det som har blitt gjort er innenfor oppgavens rammer og problemstilling.

Arbeidet har blitt fordelt slik at hvert gruppemedlem fikk 1/3 av arbeidsmengden. Dette har fungert bra. Øystein tok på seg ansvaret som prosjektleder og har dermed hatt litt mer av det organisatoriske arbeidet med å sette dager til arbeid og å booke rom hvor vi har jobbet.

## B.2 Timeliste

Timelisten under forteller hvor mye hver person har jobbet med oppgaven. Der hvor alle eller flere har jobbet er antall timer jobbet oppgitt per person. Dette betyr at dersom alle på gruppen jobbet sammen i 5 timer så vil det være  $3 \times 5 = 15t$  som er oppgitt i listen under.

**Tabell 3: Timeliste**

Dato	Uke	Person	Aktivitet	Timer
29.jan		5 Alle	Innledende arbeid	6
04.feb		6 Alle	Møte med veileder	3
04.feb		6 Alle	Jobbe med forstudie	9
09.feb		6 Øystein	Litteratursøk	3
11.feb		7 Alle	Jobbe med oppgaven	6
14.feb		7 Alle	Veiledning	1,5
14.feb		7 Øystein	Sending av E-mailer & litteratursøk	4
21.feb		8 Alle	Veiledning	1,5
24.feb		8 Øystein	Lesing av litteratur	5
25.feb		9 Øystein	Lesing av litteratur	4
04.mar		10 Robin	Litteratursøk	3,5
05.mar		10 Alle	Møte med Lars & arbeid	9
06.mar		10 Robin	Litteratursøk	3
07.mar		10 Alle	Veiledning	1,5
12.mar		11 Robin	Litteratursøk	4,5
13.mar		11 Øystein	Lesing av litteratur & arbeid presentasjon	4
14.mar		11 Alle	Veiledning	1,5
15.mar		11 Øystein	MatLab/Simulink	2
19.mar		12 Robin	Arbeid med oppgave	3,5
21.mar		12 Robin	Arbeid med oppgave	2
21.mar		12 Øystein	Presentasjon og Litteratursøk MatLab Finpusset	5
25.mar		13 Sindre	Midveispresentasjon	3
26.mar		13 Robin	Arbeid med oppgave	3
28.mar		13 Robin	Arbeid med oppgave	2,5
08.apr		15 Robin	Arbeid med oppgave	1,5
11.apr		15 Robin	Arbeid med oppgave	2
11.apr		15 Sindre	Arbeid med oppgave	2
25.apr		17 Robin	Arbeid med oppgave	1
30.apr		18 Robin	Arbeid med oppgave	3
06.mai		19 Robin	Arbeid med oppgave	2
06.mai		19 Sindre	Arbeid med oppgave	1,5
09.mai		19 Robin	Arbeid med oppgave	1,5
15.mai		20 Alle	Arbeid med oppgave	12
16.mai		20 Alle	Arbeid med oppgave	15
21.mai		21 Øystein+Sindre	Arbeid med oppgave	10
22.mai		21 Sindre	Ferdigstilling av expoplakat	2
23.mai		21 Alle	Veiledning + ferdigstilling av første utkast	15
28.mai		22 Alle	Finpuss + veiledning	17,5
<b>Sum</b>				<b>177</b>