

Sondre Eide Borchgrevink  
Hallvard Hustoft  
Henrik Smestad Aamodt

# Forenklet elektrisk brems for vannkraftverk ved åpen statormetodikk

Bacheloroppgave i Elkraft og bærekraftig energi  
Veileder: Robert Nilssen

Mai 2022



Sondre Eide Borchgrevink  
Hallvard Hustoft  
Henrik Smestad Aamodt

# **Forenklet elektrisk brems for vannkraftverk ved åpen statormetodikk**

Bacheloroppgave i Elkraft og bærekraftig energi  
Veileder: Robert Nilssen  
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk  
Institutt for elkraftteknikk



Kunnskap for en bedre verden





<b>Oppgavetittel:</b> Forenklet elektrisk brems for vannkraftverk ved åpen statormetodikk Simplified electric brake for hydropower plants by open stator methodology	
<b>Forfattere:</b> Henrik Smestad Aamodt Sondre Eide Borchgrevink Hallvard Hustoft	<b>Prosjektnummer:</b> E2236
	<b>Innleveringsdato:</b> 20/05/2022
	<b>Gradering:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Åpen <input type="checkbox"/> Lukket
<b>Studium:</b>	Elektroingeniør - BIELEKTRO
<b>Studieretning:</b>	Elkraft og bærekraftig energi
<b>Veileder internt:</b>	Robert Nilssen
<b>Institutt:</b>	Institutt for elkraftteknikk
<b>Oppdragsgiver:</b>	Statkraft
<b>Kontaktperson:</b>	Pål Glimen
<b>Sammendrag(norsk og engelsk):</b> <b>Statkraft</b> ønsker å undersøke en forenklet versjon av elektrisk brems for vannkraftverk. Metoden opprettholder klemmespenningen ved å ikke koble ut feltbryter når vannveien stenges. Resulterende simuleringsmodell viser mellom 14 og 55% reduksjon av stopptid sammenliknet med fri spinn. <b>Statkraft</b> wants to investigate a simplified version of electric braking for hydropower plants. The method maintains the terminal voltage by keeping the field switch closed when the drain valve is shut. The resulting simulation model shows between 14 and 55% reduction of stop time compared to free spin.	
<b>Stikkord norsk</b> Generator, Vannkraftverk Åpen statormetodikk	<b>Stikkord engelsk</b> Generator, Hydropower plants Open stator methodology

## Sammendrag

I 2021 publiserte Statnett en nasjonal veileder (NVF), denne stiller krav om synkrone produksjonseenheters funksjonalitet samt hvordan kravene kan oppfylles. Flere eldre vannkraftverk har ingen bremsesystemer installert og har dermed lang stopptid, dette medfører at enkelte produksjonseenheter ikke oppfyller den nasjonale veilederen. Fremtidige endringer av driftsmønster vil føre til økt antall start- og stoppforløp.

I denne rapporten studeres ulike metoder for stopp av vannkraftverk. Primært undersøkes en metode som opprettholder klemmespenningen ved å ikke koble ut feltbryter når vannveien stenges. I metoden utnyttes jern og magnetiseringstap som ekstra bremsemoment til å redusere stopptiden. Denne metoden kalles for "åpen statormetodikk". Nåværende bremsemetoder er "kortsluttet statormetodikk" og "fri spinn". Kortsluttet statormetodikk innebærer et eksternt bremsesystem som kortslutter statoren for å fremprovosere et bremsemoment. Under metoden fri spinn vil kun mekanisk friksjon stå for bremsemomentet.

Det er benyttet en kombinasjon av Matlab, Simulink og Excel til å fremstille en modell som kan beregne stopptid for vannkraftverk med pelton-turbiner. Modellen beregner stopptid for de overnevnte stoppmetodene og er basert på tekniske data fra et kraftverk. I oppgaven fremstilles en prosentvis andel av de forskjellige tapene, samt tidsbesparelsen andelen utgjør ved de ulike metodene. Modellen er ikke testet i et praktisk forsøk, verken i laboratorieforsøk eller i skarp test. Den tar ikke hensyn til påvirkningen synkende frekvens har på magnetiseringstransformatoren eller effekten av ujevn feltspenning ved lav frekvens. Modellen er også basert på få anlegg og kan derfor inneholde uforutsette feil.

Resultatene viser at et større pelton anlegg kan gå fra 70 minutter stopptid med fri spinn til **31 minutter** ved å ta i bruk åpen statormetodikk. Dette tilsvarer en reduksjon på 55%. Kortsluttet statormetodikk for samme anlegg gir en stopptid på 12 minutter og en reduksjon på 82%. Et mindre pelton anlegg kan gå fra 40 minutters stopptid med fri spinn til **34 minutter** med åpen statormetodikk. En 14% reduksjon. På dette anlegget er det estimert en stopptid på 9 minutter som tilsvarer en reduksjon på 77% ved bruk av kortsluttet statormetodikk.

Åpen statormetodikk kan dermed i visse tilfeller være et alternativ til tradisjonell elektrisk brems. Modellen viser at i anlegg med høy andel jern- og magnetiseringstap er forbedringspotensialet størst, derimot har anlegg med mindre andel en mindre fortjeneste. Åpen statormetodikk mister en del av sin bremseeffekt ved lave turtall, og det er dermed fordelaktig å installere en mekanisk brems for å redusere tiden av bremseforløpet. Det anbefales å undersøke grundigere de antagelsene som er gjort i dette prosjektet. Videre bør det følges opp med et praktisk forsøk på et reelt anlegg for å verifisere resultatene og konklusjonen. Prosjektets mål er å anse som nådd og resultatet legger godt til rette for å oppfylle de veiledende kravene gitt i NVF og imøtekomme driftsendringer i kraftproduksjonsmarkedet.

## Abstract

In 2021 Statnett published a guide (NVF), which sets requirements for the functionality of synchronous production units and how the requirements can be met. Several older hydropower plants have no braking systems installed and have a long stop process, which means that some production units do not comply with the guide. Future changes in operating patterns will lead to an increased number of start and stop processes. In this report various methods for stopping hydropower plants has been studied. Primarily, a method is investigated that maintains the terminal voltage by keeping the field switch closed when the drain valve is shut. The method uses iron- and magnetization-losses as extra braking torque to reduce the stopping time. This method is called "open stator methodology". Existing braking methods are "short-circuited stator methodology" and "free spin". Short-circuited stator methodology involves an external braking system that short-circuits the stator to produce a braking torque. Under the free spin method, only mechanical friction will account for the braking torque.

A combination of Matlab, Simulink and Excel has been used to produce a model that can calculate stop time for hydropower plants with Pelton turbines. The model calculates the stopping time for the above-mentioned stopping methods and is based on technical data from a power plant. The technical data found in this thesis is given in the percentage of the various losses, as well as the time savings the share makes up by the various methods. The model has not been tested in a practical experiment, neither in laboratory experiments nor in a sharp test. It does not consider the effect of decreasing frequency on the excitation transformer or the effect of uneven field voltage at low frequency. The model is also based on few plants and may therefore contain unforeseen errors.

The results show that a larger Pelton plant will go from 70 minutes with free spin to **31 minutes** by using open stator methodology. This corresponds to a reduction in stoptime of 55%. Short-circuited stator methodology for the same system gives a stop time of 12 minutes and a reduction in stop time of 82%. A smaller Pelton system will go from 40 minutes free spin stop time to **34 minutes** with open stator methodology. A 14% reduction. At this plant, a break time of 9 minutes is estimated, which corresponds to a reduction of 77% when using short-circuited stator methodology.

Open stator methodology can thus in certain cases be an alternative to traditional electric braking. The model shows that in plants with a high proportion of iron and magnetization losses, the potential for improvement is greatest, whereas plants with a smaller proportion have a smaller profit. Open stator methodology loses part of its braking effect at low speeds, and it is thus advantageous to install a mechanical brake to reduce the time of the braking process. It is recommended to further examine the assumptions made in this project. Furthermore, it should be followed up with a practical testing at a real facility to verify the results and the conclusion. The aim of the project is considered achieved and facilitates good conditions for meeting the guideline given in NVF and meeting operational changes in the power production market.

## Forord

Bacheloroppgaven er skrevet på grunnlag av opparbeidet kunnskaper ved endt 3-årig utdanning ved Norges teknisk- naturvitenskaplige universitet (NTNU), institutt for elkraftteknikk. Prosjektgruppen har fordypning i elkraft og bærekraftig energi, som resulterte i ønsket oppgave innsendt av Statkraft. Formålet med oppgaven er å opparbeide seg god teoretisk bakgrunn. Dette skal hjelpe å løse praktiske problemer ved å modellere og simulere stoppforløpet av en generator for vannkraftverk ved metodikk ennå ikke er tatt i bruk.

Oppgaven ble påbegynt 14.01.22 og har en varighet til 20.05.22. I løpet av prosjektperioden har prosjektgruppen fått personlig kurs i magnetisering og spenningsregulering av synkrongeneratorer i vannkraftverk utført av seniorspesialist Pål Glimen, samt omvisning med fysiske innblikk i kraftproduksjon ledet av kraftverkssjef. Blandingen av teori og praktisk innblikk har dannet et godt grunnlag for besvarelse av problemstilling.

Et forprosjekt ble utført, som et fundament for en systematisk besvarelse. Forprosjektets formål er å organisere, kvalitetssikre og strukturere fremdriftsplan påfølgende uker. Prosjektgruppen opplevde at forprosjektet ga konkrete mål slik at arbeidsfordelingen ga ønsket fremdrift.

Takk rettes til:

Pål Glimen (Statkraft) for utgitt oppgave og introduksjon til kraftbransjen.

Erik-Anant Stedjan Narayan (Statkraft) for innhenting av data og introduksjon av simuleringsprogrammer.

Erick Fernando Alves (Statkraft, NTNU) for bred erfaring innunder fagfeltet og teoretiske innspill.

Robert Nilssen (NTNU) som veileder i prosjekt, deling av ressurser og kunnskap med fremtredende engasjement.



Hallvard Nikolaus Hustoft



Henrik Smestad Aamodt



Sondre Eide Borchgrevink  
**Trondheim 19.05.22**

# Innholdsfortegnelse

<b>Sammendrag</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Forord</b>	<b>iv</b>
<b>Figurliste</b>	<b>vii</b>
<b>Symbolliste</b>	<b>x</b>
<b>Begrepsliste</b>	<b>xi</b>
<b>Forkortelser</b>	<b>xi</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
<b>2 Teori</b>	<b>1</b>
2.1 Økonomiske grunnprinsipper . . . . .	2
2.2 Bakgrunn vannkraftverk . . . . .	2
2.3 Oppbygningen av vannkraftverk . . . . .	3
2.3.1 Generell struktur for vannkraftverk . . . . .	3
2.3.2 Stasjonstransformator og overføringstransformator . . . . .	4
2.4 Fjernstyring og lokalstyring av vannkraftverk . . . . .	5
2.5 Generell start- og stoppsekvens for generator . . . . .	5
2.6 Vannkraftverkets komponenter . . . . .	7
2.6.1 Synkrongeneratoren . . . . .	7
2.6.2 Magnetiseringssystemet . . . . .	12
2.6.3 Turbintyper . . . . .	13
2.6.4 Lager . . . . .	14
2.6.5 Andre hjelpekomponenter . . . . .	15
2.7 Stoppmetoder for vannkraftverk . . . . .	16
2.7.1 Mekanisk brems . . . . .	17
2.7.2 Fri spinn med og uten mekanisk brems . . . . .	18
2.7.3 Kortsluttet statormetodikk . . . . .	19
2.7.4 Åpen statormetodikk . . . . .	21
2.8 Tap i en synkrongenerator . . . . .	23
2.8.1 Konstante tap . . . . .	23
2.8.2 Variable tap . . . . .	25
<b>3 Metoder</b>	<b>26</b>
3.1 Begrensninger . . . . .	26
3.2 Modellen . . . . .	27
3.3 Tapene . . . . .	31
3.3.1 Konstante tap . . . . .	31
3.3.2 Variable tap . . . . .	36

<b>4 Resultater</b>	<b>40</b>
4.1 Større Pelton aggregat . . . . .	40
4.1.1 Fri spinn . . . . .	41
4.1.2 Åpen statormetodikk . . . . .	42
4.1.3 Kortsluttet statormetodikk . . . . .	43
4.2 Mindre Pelton aggregat . . . . .	44
4.2.1 Fri spinn . . . . .	45
4.2.2 Åpen statormetodikk . . . . .	46
4.2.3 Kortsluttet statormetodikk . . . . .	47
<b>5 Diskusjon</b>	<b>49</b>
<b>6 Konklusjon</b>	<b>51</b>
<b>Referanser</b>	<b>52</b>
<b>Vedlegg</b>	<b>54</b>

## Figurliste

1	Høytrykk vannkraftverk, [1] . . . . .	2
2	Lysebotn 2 Maskinsal, [2] . . . . .	3
3	Planløsning Lysebotn 2, [3] . . . . .	3
4	Maskinsal under konstruksjon, [4] . . . . .	4
5	Trommel 110MVA generator, [4] . . . . .	4
6	Kontrollrom, [5] . . . . .	5
7	Kontrollpanel, [6] . . . . .	5
8	Generelt enlinjeskjema for synkrongenerator m. selforsynt magnetiseringsutstyr, [7] . . . . .	7
9	Enkel synkronmaskinmodell, [8] . . . . .	8
10	Statorblikk samt spor, [9] . . . . .	8
11	Rotor med runde poler. [10] . . . . .	9
12	Rotor med utpreget poler. [10] . . . . .	9
13	Tverrsnitt av en del av stator samt en utpreget pol. [11] . . . . .	9
14	Generator som flyter på nett. [11] . . . . .	10
15	Generator påført vann. [11] . . . . .	10
16	a) Plot av flux mot feltstrøm for synkrongenerator. b) Magnetiseringskurven for en synkrongenerator, [12] . . . . .	12
17	Fallhøyde og trykksjakt, [13] . . . . .	13
18	Oppbygging lager, [14] . . . . .	14
19	Defekt metall bærelager, [15] . . . . .	14
20	Nærbilde bremsekloss, [16] . . . . .	17
21	Bremsekloss og bremsekive, [16] . . . . .	17
22	Fri spinn. Selforsynt feltbryter koblet ut [7] . . . . .	19

23	Kortsluttet statormetodikk. Ekstern feltbryter og MT kobles inn, sammen med kortslutningsbryter i statoruttak, [7] . . . . .	21
24	Åpen statormetodikk. Selvforsynt feltbryter holdes inne under bremseforløp, [7] . . . . .	22
25	Klassifikasjon av tap i en roterende maskin, [8] . . . . .	23
26	Hysteresekurve, [11] . . . . .	24
27	a) Tomgangstap vs. feltstrøm, b) Tomgangstap vs. tomgangsspenning. [8]	25
28	Rotasjonsfart avhengig av tid, grafisk tegnet i Simulink . . . . .	29
29	Feltstrøm i åpen statormetodikk visualisert i Simulink . . . . .	31
30	Blokkskjema for hysterese-tap i Simulink . . . . .	33
31	Blokkskjema for virvelstrømstap i Simulink . . . . .	34
32	Blokkskjema for lagertap i Simulink . . . . .	35
33	Blokkskjema for ventilasjonstap i Simulink . . . . .	36
34	Blokkskjema for kortsluttet stator kobbertap i Simulink . . . . .	37
35	Blokkskjema for magnetiseringstap i Simulink . . . . .	38
36	Blokkskjema for magnetiseringsutstyrstap i Simulink . . . . .	39
37	Større pelton. Bremseforløp . . . . .	40
38	Større pelton. Fri spinn. RPM, PI, If . . . . .	41
39	Større pelton. Åpen statormetodikk. RPM, PI, If . . . . .	42
40	Større pelton. Kortsluttet statormetodikk. RPM, PI, If . . . . .	43
41	Mindre pelton. Bremseforløp . . . . .	44
42	Mindre pelton. Fri spinn. RPM, PI, If . . . . .	45
43	Mindre pelton. Fri spinn. Tapforløp . . . . .	45
44	Mindre pelton. Åpen statormetodikk. RPM, PI, If . . . . .	46
45	Mindre pelton. Åpen statormetodikk. Tapforløp . . . . .	47
46	Mindre pelton. Kortsluttet statormetodikk. RPM, PI, If . . . . .	48



47	Mindre pelton. Kortsluttet statormatodikk. Tapforløp . . . . .	48
48	Skjermdump Excel fil . . . . .	55
49	Oversiktsbilde Simulink fil . . . . .	56

## Symbolliste

Symbol	Enhet	Forklaring
$^{\circ}\text{C}$		Temperatur Celsius
$\alpha$		Mekanisk vinkel
$\delta$		Fasevinkel
$\Phi$		Magnetisk fluks
$\omega$	rad/s	Rotasjonshastighet
$\omega_n$	rad/s	Nominell rotasjonshastighet
$\omega_s$	rad/s	Synkronrotasjonshastighet
$E$	V	Klemmespenning
$E_0$	V	Indusert spenning
$E_x$	V	Feltspenning
$f_N$	Hz	Nominell frekvens
$I_f$	A	Feltstrøm
$I_{sc}$	A	Kortslutningsstrøm
$U_n$	V	Nominell spenning
$n$	rpm	Hastighet i omdreininger per minutt
$n_s$	rpm	Synkronhastighet i omdreininger per minutt
$n_N$	rpm	Nominell hastighet i omdreininger per minutt
$P_{el}$	W	Elektrisk effekt
$P_{mech}$	W	Mekanisk effekt
$X_s$	$\Omega$	Synkronreaktans
$Z$	W	Last

## Begrepsliste

Begrep	Forklaring
Effektbryter	Bryter mellom generator og ytre nett
Feltbryter	Bryter mellom generator og magnetiseringssystem
Ferromagnetisk materiale	Lav motstand for magnetisk fluks
Generatorklemmene	Tilkoblingspunkt for generator, koblet i stator
Metning	En tilstand hvor magnetisering ikke kan økes betydelig ved økning av den magnetiske feltstyrken
Opprusing	Økning av turtall
Permabilitet	Et stoffs evne til å føre magnetisk fluks før det går i metning
"Splashing"	Ekstra tap forbundet med vannmotstand på francis turbiner
Tomgang	Ingen belastning av turbin
Innslippsmekanisme	Ventil for vannvei mot turbin
Vannhammer	Rask lukking av innløpsventil
Ytre nett	Det utenforliggende kraftnettet

## Forkortelser

Forkortelse	Beskrivelse
AC	Alternating current, vekselstrøm
AVR	Automatic Voltage Regulator, automatisk spenningsregulator
DC	Direct Current, Likestrøm
EMF	Electromotive force, Elektromotorisk spenning
FFT	Fast frekvens transformatorer
MMF	Elektromotorisk kraft
MT	Magnetiseringstransformator
NVF	Nasjonal veileder for funksjonskrav i kraftsystemet
VFT	Variabel frekvens transformatorer

# 1 Innledning

Endring av produksjonsmønsteret i kraftnettet går mot en mer variabel og væravhengig produksjon. Det blir derfor mer lønnsomt for kilder som kan variere sin egen produksjon uavhengig av været. Produksjonsbehovet endres oftere, dermed er korte stopptider viktigere enn før slik at produksjonen kan skje ved høyest fortjeneste. En stor andel vannkraftverk er gamle og bygget på en tid hvor kontinuerlig produksjon var vanlig. Mange av dem har ingen metode for å fortkorte stoppforløpet.

Statnett beskriver i sin veileder (NVF) at en mulig løsning er installasjon av en elektrisk brems som kan redusere stopptiden [17]. Eksisterende løsninger for elektrisk brems har høye investeringskostnader og tar tid å installere. Målsetting for oppgaven er å undersøke hvorvidt eksisterende komponenter i vannkraftanleggene kan brukes til å lage en forenklet elektrisk brems som ikke krever noe fysisk installasjon.

Arbeidet omfatter utforming av en brukervennlig simuleringsmodell til testing og analyse av ulike vannkraftanlegg. Modellens resultater danner grunnlaget for en rapport som utelukkende tar for seg vannkraftverk med statisk selvmagnetiserte synkrongeneratorer. Studien vil ikke undersøke feilsituasjoner og vil anta kontrollerte stoppsekvenser fra lastavslag til stillestand.

# 2 Teori

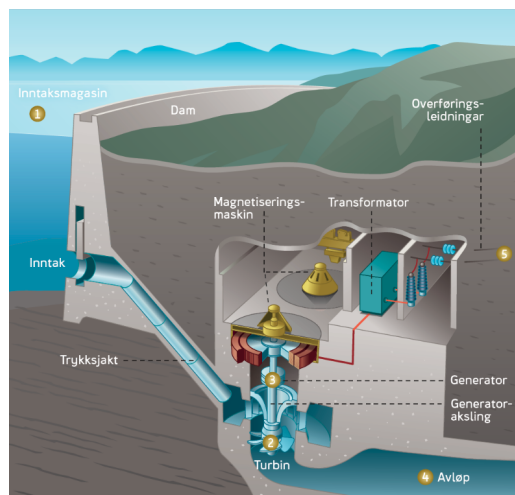
Under teoridelen skal en kunne danne seg et bilde av hvordan vannkraftproduksjon foregår, hvilke komponenter som brukes og hvordan komponentene fungerer sammen. Først en forklaring av bruksmønsteret til vannkraftproduksjon. Deretter en gjennomgang av hvordan vertikale høytrykks vannkraftverket ser ut og fungerer fra utsiden av kraftverket til de indre komponentene. Etterfulgt av synkrongeneratorens virkemåte og dens komponenter. En stor del av oppgaven går ut på å identifisere ulike tapsmomenter som forekommer under kraftproduksjon, disse blir detaljert beskrevet sammen med oppgavens formål om stoppforløpet til en generator.

## 2.1 Økonomiske grunnprinsipper

Stopp-kostnadene til et aggregat er direkte tilknyttet tapt produksjonsinntekt. Dataprogrammer beregner en vannverdi som er påvirket av prisprognoser på kort og lang sikt. Med optimalt forbruksmønster kan det påregnes opptil flere start- og stoppsekvenser i løpet av en dag for å utnytte vannverdipotensialet. Mesteparten av Norges kraftproduksjon kommer fra gamle kraftanlegg, derfor er nye løsninger for opprusting og ombygging nødvendig for å imøtekomme de nye bruksmønstrene. En omfattende ombygging av generator er lite ønsket, da den ikke er operativ i denne perioden, samt høye kostnader knyttet til arbeid. Nye metoder bidrar til tidsbesparende løsninger, lavere utgifter og legger et grunnlag til at fremtidige løsninger kan utvikles. En ny mulig stoppmetode kan bidra til mer fleksibel drift samt skape mulighet for en økning i kraftproduksjon.

## 2.2 Bakgrunn vannkraftverk

Et vannkraftverk utnytter den potensielle energien i høydeforskjellen mellom en demning og et kraftverk til å produsere strøm. Lavtrykks vannkraftanlegg benytter en mindre høydeforskjell, også kalt fallhøyde, og er plassert i elvedrag med høy vanngjennomføring. Vannmengden i elva styrer kraftverkets evne til kraftproduksjon, og dermed vil oppdemningen fungere som en vannføringsregulator med liten oppdemningsfunksjon. Kraftproduksjonen blir ofte begrenset til en bestemt vannføring som skal være oppnådd videre ned elven. Høytrykk vannkraftanlegg benytter større fallhøyder med store naturlige eller utarbeidete dammer som inneholder et stort volum av vann. Dammene, også kalt vannmagasin, benyttes for lagring av overskuddsvann og sørger for tilstrekkelig vannførsel ved underskuddsperioder. Vannmagasinenes andre oppgave er som oppsamlingspunkt hvor tilsig av vann fra omliggende nedfallsfelt, dvs. hvor nedbør er tiltenkt å oppstå, samles. Vannet fra magasinet går inn i inntaket hvor rørbruddsventilen er installert, og gir mulighet for å fullstendig stenge trykksjaktene. Videre føres vannet inn i en eller flere trykksjakter, avhengig av konstruksjon og antall generatorer. Trykksjaktene er utsprenge tunellgater i fjellet, sprutet med betong for glatt overflate som forhindrer steinavfall som kan skape havari eller uheldig stopp av turbin. Sjakten kan ha strekning på flere kilometer og høydeforskjell mellom innløp og utløp på hundrevis av meter, for



Figur 1: Høytrykk vannkraftverk, [1]

## 2.3 Oppbygningen av vannkraftverk

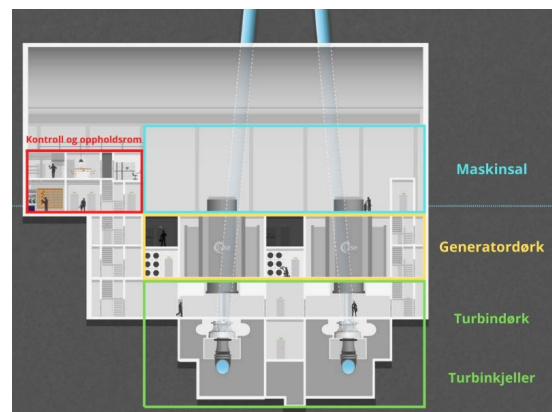
opparbeidelse av trykk. Kraftproduksjon inne i fjell kan være flere kilometer inn i fjellet, samt store høydeforskjeller. Ved lange strekninger i rørsjakt kan stabilitet av vanntrykket endres, løsningen for dette er installasjon av kammer for utligning av trykk underveis i vanngata. Kraftproduksjon som befinner seg inne i fjell krever minimum to mulige utganger for evakuering hvis en uønsket hendelse oppstår, slik at alternativ utgang kan benyttes [18]. Tunnelen for personell og utstyr (typisk størrelse på 45-60m<sup>2</sup>) krever stor plass til eksempelvis frakt av komponenter, installasjon av komponenter og ut- og innhenting av komponenter ved utskifting. Vannkraftverk krever derfor god planlegging av konstruksjon for drift og personellsikkerhet. Ved innløpsventilen mot turbinentrommelen benyttes i hovedsak to typer ventiler, kuleventil og dreiespjeldsventil, som ved nødtilfeller kan stenge vannveien mekanisk ved å utløse en motvekt som er montert slik at den vil påføre en sterk kraft for å motarbeide vannet. Dreiespjeldsventilen bruksområde egner seg for anlegg med fallhøyde opp til 150m, kuleventil blir brukt til fallhøyde opp til 1200m [19]. Mellom innløpsventilen er en avlastningsventil installert som fyller vannkammer for trykkavlastning. Hvis trykket mellom innløpsventilen og turbinentrommel ikke er utlignet før åpning av innløpsventil, kan det påføre turbinen defekter [20]. Ved vanntrykkbelastning av turbin åpnes trommelens innslippsmekanisme, deretter begynner turbinen og spinne å anlegget genererer strøm. På vei ut av turbinentrommelen føres vannet ned i et sugerør til et avløpsrør som fører vann ut av systemet.

## 2.3 Oppbygningen av vannkraftverk

### 2.3.1 Generell struktur for vannkraftverk



Figur 2: Lysebotn 2 Maskinsal, [2]



Figur 3: Planløsning Lysebotn 2, [3]

Fra inngangstunellen er maskinsalen normalt det første rommet som entres. Maskinsalen er utformet med stor takhøyde og kranløsninger for installasjon og tilpassing av komponenter som brukes i generatoren. Figur 2 viser toppen av generator hvor det finnes magnetiseringsutstyr og børsteavsug fra sleperinger. I etasjen under er generatoren plassert inne i eget rom, kalt generatordørk, som vist

## 2.3 Oppbygningen av vannkraftverk

i Figur 3, da generatoren er sensitiv for støv og avhengig av fast temperatur. I en rapport skrevet av Voith brukes en tommelfinger-regel som sier at ved en konstant økning av temperatur over 5 grader fra driftstemperatur vil gi halvert levetid [21]. Et bærelager er plassert horisontalt mellom maskinsal og generatordørk som også har avsug av oljestøv, lagerkomponentene vil bli forklart senere i dette kapitlet (2.6.4). Under generatordørken befinner turbindørken seg, den består av et aksielt styrelager som holder akslingen på plass og fjerner vibrasjoner. Turbinkjelleren underst består av vanninntaket fra utvendig trykksjakt som blir overført til stålrør, deretter går røret inn mot innløpsventil. Røret går videre inn mot trommelen hvor turbinen er installert. Ut av trommelen går sugerøret som er viderekoblet til avløpsrøret.



Figur 4: Maskinsal under konstruksjon, [4]



Figur 5: Trommel 110MVA generator, [4]

### 2.3.2 Stasjonstransformator og overføringstransformator

For vannkraftverkets interne driftssystemer og kraftdistribusjon brukes to separate transformatorer; stasjonstransformator og overføringstransformator. Stasjonstransformatoren er plassert inne i kraftverket, den driver vitale komponenter som lys, varme, ventilasjon og generelt forbruk i anlegget. Den forsyner også generatorens hjelpesystemer som pumper og viftesystemer. Stasjonstransformatoren får tilført strøm fra generatoren, det ytre nettet eller en nødstrøms-løsning. Denne løsningen kan være et batteri eller en dieselgenerator som kan drifte de aller viktigste komponentene og utføre en start av generatoren. Overføringstransformatoren endrer spenningen fra generatorspenning til spenningen brukt i kraftnettet. Plassering av transformatoren varierer om den står innvendig i kraftverket eller utendørs. Plasseres transformatoren utendørs kan det bidra med overføringstap mellom generator og strekningen til utsiden av fjellet, siden spenningen ut av generatoren er lavere enn overføringsnettet. Strekning og tverrsnitt av kabledere er avgjørende for overføringstapene.



## 2.4 Fjernstyring og lokalstyring av vannkraftverk

Internasjonale standarder for standardisering og standardisering av hvordan styringssystemet fungerer er essensiell for driftforståelse for personell, trygg drift, fremtidige endringer og utskifting av komponenter. Kraftverk er utstyrt med eget kontrollrom som vist i Figur 3. Her kan data avleses, samt lokalt styre kraftverket i sanntid. I kontrollrommet er automatikken oppbevart med utstyr som styringsenheter, PLS-blokker og releer samlet på ett sted for enkel betjening. Styringen av vannkraftverk skjer i hovedsak fjernstyrt ved hjelp av programmerte enheter som er unikt for et spesifikt anlegg. Komponentene kan lokalstyres ved å benytte manuelle bryterpanel, se Figur 7. Mulighet til lokal drift er spesielt viktig under nødstilfeller hvor umiddelbar korreksjon er nødvendig. Anlegget skal tolerere å bli fjernstyrt, lokalt styrt eller en kombinasjon av dette, der stabiliteten og logikken i anlegget opprettholdes av det automatiske anlegget. Kraftverket vil normalt bli fjernstyrt fra en driftssentral, lokalstyring kan være nødvendig i en nødsituasjon. Trådløs overføring av drift og styresystem mellom kraftverk og operatørsentraler har mange fordeler. En felles operatørsentral kan overvåke og kontrollere flere kraftverk samtidig med datainnstrømming kontinuerlig eller med passende intervaller [22]. Dette har fordeler som effektivisering og besparelse av personalkostnader. Det stilles strenge krav for trådløs overføring. Dersom det oppstår en uønsket situasjon, skal overvåkningen detektere feil og varsle operatørsentralen for rutinemessig inngrep og forebygging av uønskede situasjoner. Hvis operasjonssentralen mister kontakt med kraftstasjon, skal stopp av generatoren utføres. Omstart av generator vil kreve en bevist handling utført av personell.



Figur 6: Kontrollrom, [5]



Figur 7: Kontrollpanel, [6]

## 2.5 Generell start- og stoppsekvens for generator

Start- og stoppforløpet av en generator brukt til vannkraft varierer i forbindelse med ulike turbintyper og konstruksjon av generator. Under presenteres en generell start- og stopp-prosess med kriterier som må innfris.



### Kriterier før oppstart

- Stilletilstand, dvs. alle komponenter er stasjonære.
- Ingen feilmeldinger, klarsignal for start
- Rørbruddventil til trykksjakt er åpen
- Fjernstyring er aktivert
- Hjelpesystemer og pumper igangsettes

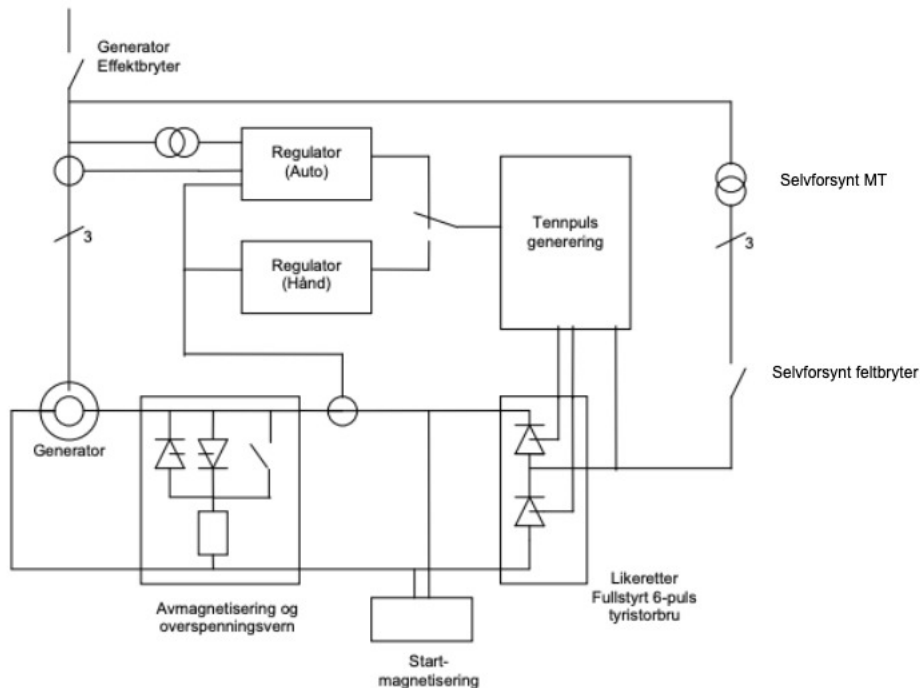
### Start-prosess

- Mekanisk brems er utkoblet
- Hydraulikkpumper til smøring av lager er påskrudd
- Åpne avlastningsventil, utlikne vanntrykk til turbin
- Åpne innløpsventil
- Åpne innslippsmekanisme gradvis, turbinen øker turtall
- Magnetisering av rotor etter innstilt turtall
- Synkronisering av frekvens mot ytre nett
- Innkobling av effektbryter mot ytre nett
- Åpne innslippsmekanisme til ønsket belastning av turbin for kraftproduksjon

### Stopp-prosess

- Stenge innslippsmekanisme til null belastning av turbin. Dette er for å forhindre opprusning av turtall
- Frakoble effektbryter mot ytre nett
- Stenge innslippsmekanisme
- Avmagnetisering av rotor etter innstilt turtall og utkobling av feltbryter
- Innkobling av elektrisk brems etter innstilt turtall hvis dette er installert
- Innkobling av mekanisk brems etter innstilt turtall hvis dette er installert
- Vent til stillestand, deretter slå av hjelpesystemer og pumper etter angitt tid

## 2.6 Vannkraftverkets komponenter



Figur 8: Generelt enlinjeskjema for synkrongenerator m. selvforsynt magnetiseringsutstyr, [7]

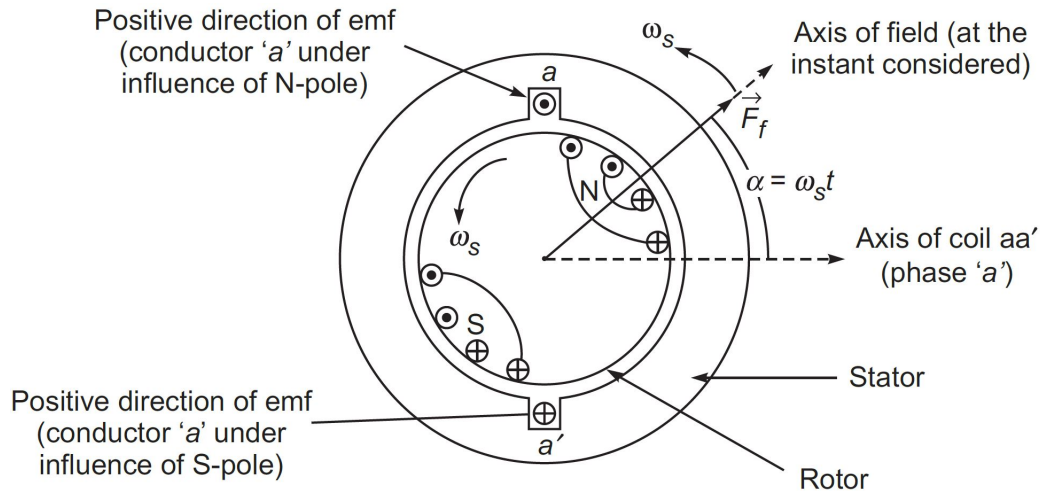
Et vannkraftanlegg består av ulike komponenter som kobles sammen til et stort automatisk anlegg. Det vil variere fra kraftverk til kraftverk hvordan de er satt sammen der vannmengde, vannhastighet og fallhøyde er blant hovedfaktorene for sammensetningen. Generelt vil det være en generator som er koblet på turbinen, en regulator og diverse hjelpeutstyr. Blir generatoren selv magnetisert vil den ha en magnetiseringstransformator (MT) og en likeretterbro, samlet kalt magnetiseringsutstyr, lokalt tilkoblet generatoren. I dette underkapittelet skal de ulike komponentene som sett i Figur 8 forklares samt hvilke underkategorier av komponentene som benyttes videre i denne oppgaven og danne et praktisk bilde av hvordan aggregatet fungerer.

### 2.6.1 Synkrongeneratoren

I vannkraftverk brukes oftest lavhastighets synkrongeneratorer med utpregede poler, plassert i kraftverkets generatordørk. Vekselstrømmaskiner finnes generelt som en av de to hovedtypene induksjon- eller synkronmaskin. Synkronmaskiner blir som oftest brukt som generatorer og har to typer rotordesign. Runde rotor benyttes til høye hastigheter mens utpregede poler brukes ved lave hastigheter [11]. Synkrongeneratorer har to magnetiske hovedkomponenter *stator* og *rotor*, som vist

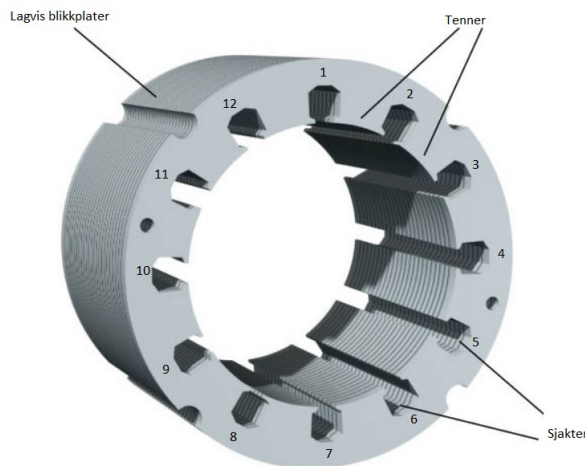
## 2.6 Vannkraftverkets komponenter

i Figur 9, hvor stator er en stasjonær hul sylindrer og består av laminert statorblikk, ankerviklinger og kjøling. Mens rotor roterer inne i stator med et lite luftgap i mellom og er bygd opp av feltviklinger tvunnet rundt en jernkjerne med dempeviklinger i polfjes.



Figur 9: Enkel synkronmaskinmodell, [8]

Statorblikket er kappet i laminerte runde blikkplater på 0.3-0.5mm tykkelse. se Figur 10. Ankerviklingene bærer ankerstrømmen, også kalt laststrøm, og forsyner effekt til kraftnettet. De tre fasene er 120° faseforskjøvet og er enten stjerne- eller trekantkoblet [23]. Kjølingen gjennomføres som regel med vifter som blåser luft gjennom åpninger i stator, men kan også gjøres ved hule viklinger hvor vann pumpes gjennom [11].

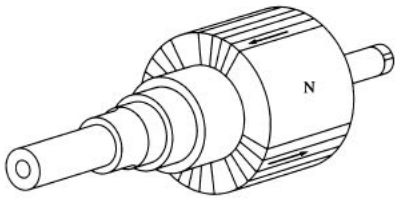


Figur 10: Statorblikk samt spor, [9]

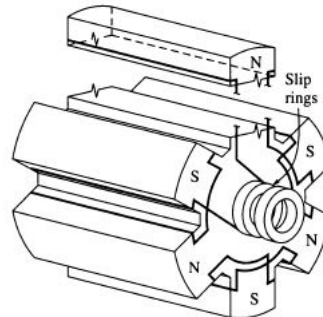
En viklet rotor i en synkrongenerator er i all hovedsak en stor elektromagnet. Dvs. at den vil ha en eller flere Nord og Sør poler som blir betegnet som "Polpar". Dermed vil rotoren ha to eller flere poler. Runde rotorer har polene innkapslet i rotorens oppbygging som vist i Figur 11, mens rotor med utprega poler vil være oppbygd som i Figur 12. For utpregete poler vil feltviklingen være tvunnet rundt de utpregede polene.

## 2.6 Vannkraftverkets komponenter

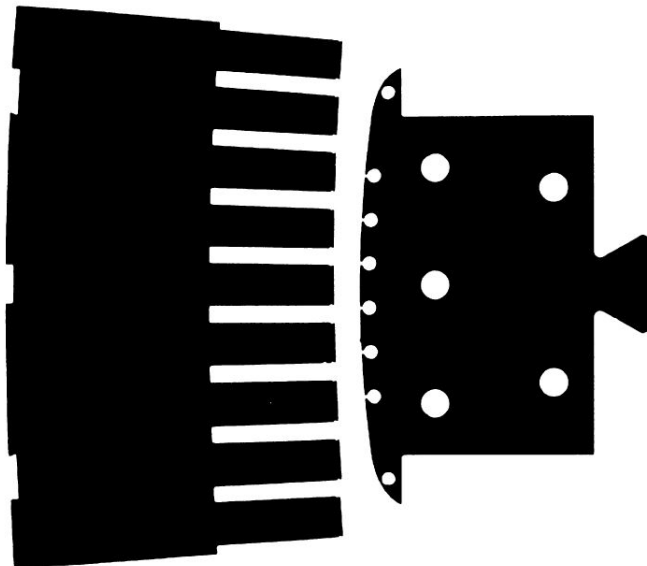
Dette skaper et stort uniformt magnetfelt som roterer når det blir påført mekanisk kraft gjennom akslingen fra turbinen.



Figur 11: Rotor med runde poler. [10]



Figur 12: Rotor med utpreget poler. [10]



Figur 13: Tverrsnitt av en del av stator samt en utpreget pol. [11]

Når feltstrøm går i feltviklingene, skapes et stasjonært magnetisk felt med en hoved nord og sørpol. Siden rotor roterer, vil det statiske magnetfeltet oppleves med varierende styrke i ankerviklingene og etter Faradays lov skape en elektromotorisk spenning (EMF).

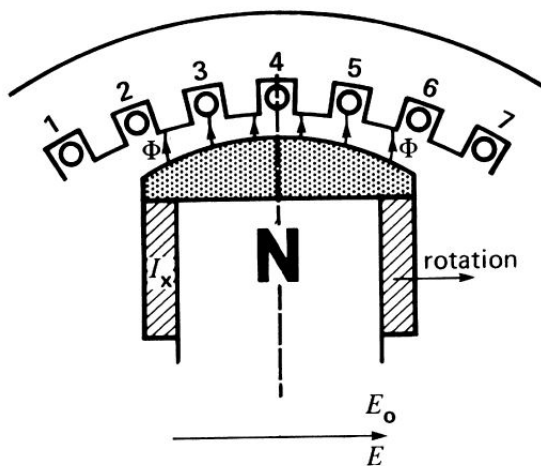
Rotorstrømmen er en likerettet vekselstrøm og mates inn i feltviklingene. Det konstante magnetfeltet den frembringer omtales som en roterende magnetisk fluks som er proporsjonal med feltstrømmen [23]. I ankerviklingene vil den konstante roterende fluksen indusere en vekslende spenning. Når en belaster stator vil statorstrømmen også skape et magnetfelts som motvirker feltet i rotor. Dette vil skape et varierende magnetfelt som motvirker den roterende fluksen. Den resulterende fluksen virker stasjonær sett fra rotor og roterende i synkronfart referert fra stator. Resultatet av den varierende laststrømmen og ankerviklingenes oppkobling gir en trefaset vekselstrøm som kan distribueres videre. Spenningskurvene over ankerviklingene er

## 2.6 Vannkraftverkets komponenter

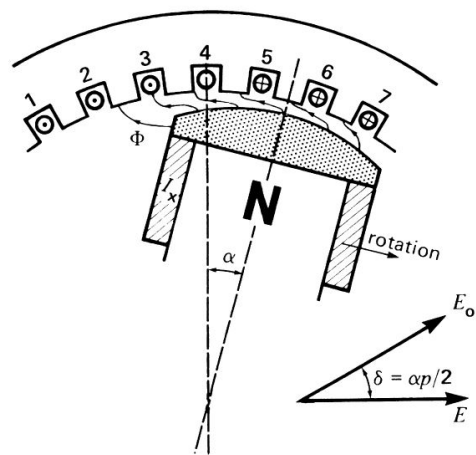
rent sinusformede utenom i tilfeller hvor viklingene er trekantkoblet og aggregatet har en påført last [11].

I en synkrongenerator vil det roterende feltet rotere ved samme fart og retning som rotor. Statoren har også like mange magnetiske poler som rotor. Dermed vil det magnetiske feltet i stator og rotor være stasjonære i forhold til hverandre. Basert på posisjonen til statorpolene på den ene siden og rotorpolene på den andre siden vil det oppstå en kraftig magnetisk tiltrekking eller frastøting mellom dem. Når generatoren flyter på det ytre nettet og strømmen i stator er null, vil det ikke være noe kraft til stede. Det er fluks i rotor som induserer spenningen  $E_0$  som vist i Figur 14. Når mekanisk kraft påføres, via vanntrykk, vil rotoren akselerere og gradvis legge seg foran med mekanisk vinkel  $\alpha$ , sammenlignet med sin originale posisjon. Dermed begynner det å flyte strøm i stator og fasevinkel  $\delta$  mellom  $E_0$  og  $E$  oppstår. Statorstrømmen skaper et roterende felt med nord og sørpoler og dermed oppstår denne tiltrekkings- og frastøtingskraften, som vist i Figur 15. Denne magnetiske kraften produserer et moment som motvirker momentet fra den mekaniske kraften i turbinen. Når dette magnetiske momentet er lik det mekaniske momentet vil  $\alpha$  holde seg konstant og dermed kan benytte formelen hvor  $\delta$  er polhjulsvinkelen mellom feltspenning  $E_x$  og klemmespenning  $E$ ,  $p$  er antall poler og  $\alpha$  er mekanisk vinkel mellom senteret på stator og rotor polene [11].

$$\delta = \frac{p\alpha}{2} \quad (1)$$



Figur 14: Generator som flyter på nett. [11]



Figur 15: Generator påført vann. [11]

**Ved stivt nett:****Krav som må oppfylles for synkronisering (Parallel operasjon) [8]:**

- Generator og stivt nett skal ha tilnærmet lik spenningsamplitude.
- Det stive nettets og generatorens fasevinkler skal være tilnærmet like.
- Generatorene skal ha tilnærmet lik fasesekvens.
- Frekvensen til generatoren som skal kobles til skal være tilnærmet lik frekvensen til generatoren som alt er tilkoblet.

**Når generatoren opererer ved stivt nett (koblet på kraftnettet)**

- Er frekvensen og klemmespenningen til generatoren kontrollert av det utenforliggende nettet
- Turtallsregulator sitt set punkt til generatoren kontrollerer den tilsynelatende effekten som generator tilfører nettet.
- Feltstrømmen til generatoren kontrollerer den reaktive effekten generatoren tilfører det ytre nettet.

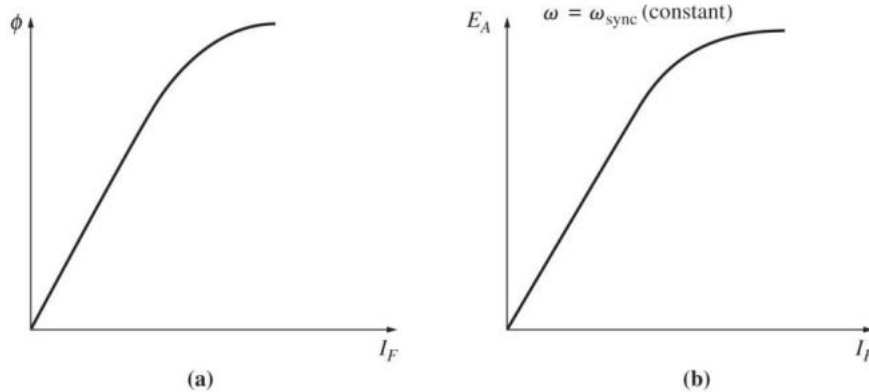
Hvis rotorparten avviker fra synkroniseringen vil fluksen i rotor ikke ses på som stasjonær og det blir dermed induisert strøm i dempeviklingene. Ifølge Lenz's lov vil denne strømmen skape et mot felt for fluksendringene og vil dermed hjelpe til å oppnå synkronisme igjen [23].

**Magnetiseringskurve**

Magnetiseringskurven, også kalt åpen-krets karakteristikk eller tomgangskarakteristikken, er en graf som viser forholdet mellom fluksen, eller den induerte spenningen i generator og der det påføres forskjellig feltstrømmer, mens stator-klemmene er frakoblet last. Visuelt vil det oppstå en lineær stigning fram til jernet i stator blir mettet som vist i Figur 16.

Den indre spenningen  $E_A$  er direkte proporsjonal med fluks  $\phi$  og rotasjonshastighet, mens fluksen i seg selv er avhengig av rotor feltstrøm  $I_f$ . Siden  $E_A$  er direkte proporsjonal med fluks er den også relatert til feltstrømmen som vist i tomgangs-karakteristikken til maskinen. [10]

## 2.6 Vannkraftverkets komponenter



Figur 16: a) Plot av flux mot feltstrøm for synkrongenerator. b) Magnetiseringskurven for en synkrongenerator, [12]

### 2.6.2 Magnetiseringssystemet

Magnetiseringssystemet består av en transformator, en tyristorlikeretter og sleperinger. Dets oppgave er å supplere nok feltstrøm så ønsket felt i rotor kan opprettholdes. I selvmagnetiserte aggregater vil høyspenningen på MT sin primærside komme fra klemmene på generator. Likeretteren vil få sin AC inngangsspenning fra sekundærsiden på transformatoren og konvertere den til ønsket DC feltspenning. Feltspenningen vil bli overført til rotor via sleperinger belagt med et platinum belegg på akslingen. Likeretteren varierer utgangsspenningen basert på angitt styringsvinkel fra styringssystemet. Feltspenningen er uttrykt etter formel 2 [24], men kan forbedres ved bruk av kondensatorer til å jevne ut rippel effekten.

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos\alpha \quad (2)$$

Hvor  $\alpha$  er fyringsvinkel til tyristorerne,  $V_{do}$  gjennomsnittlig utgangs DC spenning og  $V_{LL}$  inngående linje til linje AC spenning.

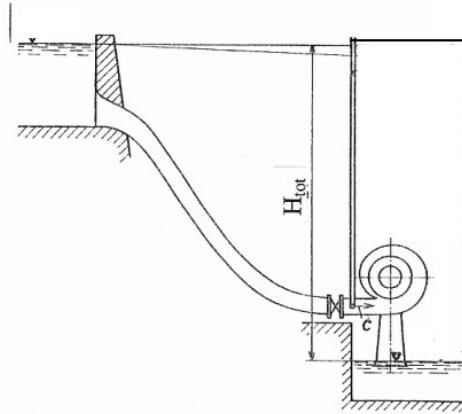
Det finnes fast frekvens og variabel frekvens transformatorer (FFT og VFT), hver designet til sitt bruksområde. I vannkraftverk er FFT vanlig da aggregatene operere ved en fast frekvens. VFT er brukt i applikasjoner hvor mottatte spenninger kan komme ved mange ulike frekvenser. Effekten av frekvensendring på FFT er uklare. Frekvensen på begge sider av en trafo er lik og forholdet mellom primær og sekundærspenningen er konstant. Se formel 3. Den magnetiske fluksen er tilsvarende spenningen delt på frekvensen [8]. Se formel 4.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (3)$$

$$\Phi = \frac{E}{f} \quad (4)$$

### 2.6.3 Turbintyper

I vannkraftanlegg benyttes tre typer turbiner; francis, pelton og kaplan. Turbinen er plassert i turbinkjelleren som vist i Figur 3. For høytrykk vannkraftverk benyttes enten francis eller pelton, for lavtrykk benyttes francis eller kaplan. Turbinens innslippsmekanisme for påføring av vann varierer med de ulike turbintypene. Valg og dimensjonering av turbintyper beregnes typisk ut fra gjennomsnittlig vannføring og fallhøyde. For å beregne gjennomsnittlig vannføring benyttes innsamlet historisk data for vannføring, som indikerer anleggets potensiale. Fallhøyden beregnes ut fra  $H_{tot}$  som sett i Figur 17.



Figur 17: Fallhøyde og trykksjakt, [13]

#### Francis

Francisturbinen blir brukt på anlegg hvor fallhøyden er 20-900 meter. Turbinens kapsling er sneglehusformet med en rekke fjernstyrte spjeld som åpnes og lukkes, åpningen på spjeldene påvirker påtrykket av vann til turbinen. Turbinen er plassert horisontalt inni kapslingen og er konstruert som en trommel, hvor vann fra spjeldene føres inn mot blader som er designet for å optimalisere opptaket av vanntrykket som påføres. Vann føres gjennom turbinbladene som føres vertikalt ut gjennom sugerøret. Turbinen har en virkningsgrad på 95% [25]. På grunn av turbinens brede bruksområde er dette den mest brukte turbintypen brukt til vannkraftproduksjon i Norge.

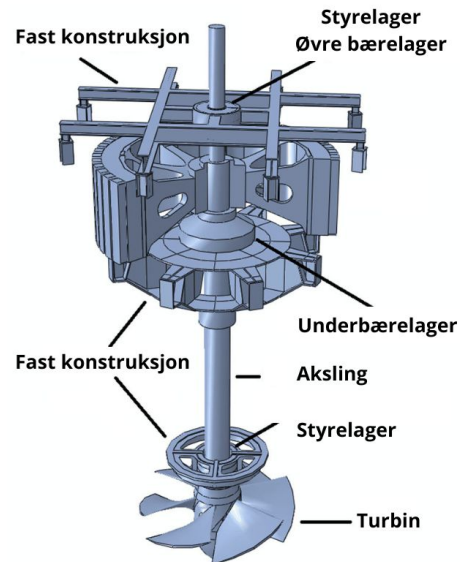
#### Pelton

Peltonturbinen blir brukt på anlegg hvor fallhøyden er 100-1800 meter. Turbinen monteres horisontalt eller vertikalt og er formet som et løpehjul med skovlbøtter som er konstruert for mottak av vann, samt få vekk tilført vann så fort som mulig for maksimal utnyttelse. Vannet føres inn i en trommel hvor flere avledere er plassert med fjernstyrte høytrykksdyser som er rettet mot turbinens skovler. Vannet ut av turbinen føres så videre gjennom sugerøret. Turbinen har en virkningsgrad på 95% [26].



### 2.6.4 Lager

Glidelageret sørger for smøring mellom fast konstruksjon og roterende aksling, dette består av hydraulikkpumper med trykksatt smøreolje for å minimere friksjon mellom overflatene. Korrekt funksjon og trykksetting av lager er viktig for å minimere slitasje av metall og for å holde akslingen til en fastsatt temperatur. Det er derfor installert temperatursensorer på lageret, slik at unormale temperaturøkninger kan avdekkes. Figur 19 viser en fast aksling med bærelager hvor det ble avdekket temperaturøkning, ved inspeksjon viste det seg at metallet mellom roterende og fast konstruksjon har fått defekter. Akslingen roteres og holdes på plass med både bærelager og styrelager. Det er derfor viktig for at hydraulikkpumpene er trykksatt før og under belastning av turbin.



Figur 18: Oppbygging lager, [14]

Antall lager kan variere ut fra produksjonsspesifikasjoner og anleggets størrelse. Styrelageret plasseres ved fleste tilfeller innunder tubindørk og øvre del av generatordørk, dens oppgave er å holde akslingen på plass for å hindre vibrasjoner og uønskede bevegelser under drift. Bærelageret holder vekten til hele konstruksjonen av akslingen og det benyttes ofte over- og underlager som er plassert i generatordørk. Hydraulikktrykket økes under start- og stoppsekvensen da akslingen har lavt turtall.



Figur 19: Defekt metall bærelager, [15]

### 2.6.5 Andre hjelpekomponenter

Generatorens gjenværende komponenter blir kun gjennomgått, da de er viktig for en komplett innføring i aggregatets funksjon, men anses som lite relevant for oppgavens formål. Spenningsregulatoren til styresystemet for magnetiseringssystemet kalles AVR (automatic voltage regulator), dette er et system som automatisk eller manuelt sørger for at generatorens utgangsspenning holdes stabil og for å holde samme spenningsverdier som det ytre nettet under nominell drift. AVR'en måler feltstrømmen og klemmespenningen, for å justere spenningen endres likeretterens leder-periode. Under start-prosess magnetiseres rotoren ved hjelp av et startmagnetiseringssystem, denne hjelpekomponenten får generatoren til å oppnå et magnetisk felt som videre selvforsynes. Startmagnetiseringen er kun for å igangsette generatorens magnetisering. I løpet av stopp-prosessen aktiveres avmagnetiseringssystemet, og feltstrømmen skrues ned til null. Denne operasjonen er en kort sekvens, som tar 2-3 sekunder å gjennomføre.

## 2.7 Stoppmetoder for vannkraftverk

I dette underkapittelet forklares ulike stoppmetoder for generator i vannkraftverk. Først en generell introduksjon, for så å utdype teorien samt danne et praktisk bilde av hvordan de forskjellige stoppmetodene fungerer. Stoppmetoden for en generator varierer etter hvilke komponenter generatoren har installert. Et gammelt vannkraftanlegg mangler mange av de mer moderne komponentene tilpasset dagens driftsmønster. Generatorer med peltoneturbin opplever lang stopptid da de roterer i luft og ikke kommer i kontakt med vann, såkalt "splashing" som francis ved stengt innløpsventil. Det kan også ha blitt utført utrustning og modernisering av anlegg etter behov eller etter nye krav som stilles av vannkraftverk. Et nyere stoppkrav fra NVF sin funksjonsveileder lyder "Synkrone produksjonsenheter  $\geq 100$  MVA, skal ha funksjonalitet som sørger for at stoppforløp tar kortere tid enn 15 minutter" [17]. For å løse dette kan anlegg moderniseres med elektrisk brems. Modernisering av anlegg er både tid- og kostnadskrevende da det kreves planlegging, tap av produksjonskostnader, innkjøp av komponenter og installasjonskostnader. Det beskrives også at alternative løsninger for å tilfredsstille kravet om stopptid kan behovsprøves.

Stoppmetodene kapittelet inneholder er de eksisterende metodene som blir brukt i dag, samt den nye alternative metoden som blir undersøkt nærmere i studien. Merk at denne metoden ikke er testet i praksis, og kan kun ses på som en eksperimentell metode.

De eksisterende stoppmetodene for generatorer:

- Nødstopp / mekanisk brems
- Fri spinn uten mekanisk brems
- Fri spinn med mekanisk brems
- Elektrisk brems med kortsluttet statormetodikk

Ny alternativ stoppmetode for generator under analysering:

- Elektrisk brems med åpen statormetodikk

### 2.7.1 Mekanisk brems

Mekanisk bremsesystem er den enkleste formen for bremsing. Generelt er alle nyere anlegg installert med mekanisk brems, eldre anlegg kan være oppdatert og dermed blitt opprustet med mekanisk brems i nyere tid. Installasjon av mekanisk brems inneholder komponenter som bremseskive, bremseklosser og hydraulisk trykkpumpesystem, se Figur 21. Ved vertikalt kraftverk er det mekaniske bremsesystemet installert på generatordørken, og ofte på undersiden av generatoren. En bremseskive av stål er fastinstallert rundt akslingen, slik at bremseskiven opererer med samme turtall som akslingen. Flere bremseklosser installeres rundt akslingen på undersiden av bremseskiven og kan påføres hydraulisk trykk slik at bremseklossene løftes og påfører friksjonsmotstand mot bremseskiven. Den mekaniske bremsen er den mest effektive bremsemetoden for å stoppe turbinen, og blir tatt i bruk i nødstilfeller. Nødstopp av generatoren fra nominelt turtall til stilletilstand innebærer stor slitasje av bremsebelegg på bremseklosser, se Figur 20. Under en normal stopp-prosess brukes den mekaniske bremsen de siste 10-30% av turtallet, avhengig av anleggets konfigurasjon. Mekanisk brems ved lavt turtall forebygger slitasje på bremseklosser, og er det mest kritiske punktet hvor akslingen har lavest energi. Mangelen på mekanisk brems den siste delen av stoppforløpet kan derfor resultere i lang stopptid, spesielt ved anlegg som benytter peltoneturbin.



Figur 20: Nærbilde bremsekloss, [16]



Figur 21: Bremsekloss og bremseskive, [16]

### 2.7.2 Fri spinn med og uten mekanisk brems

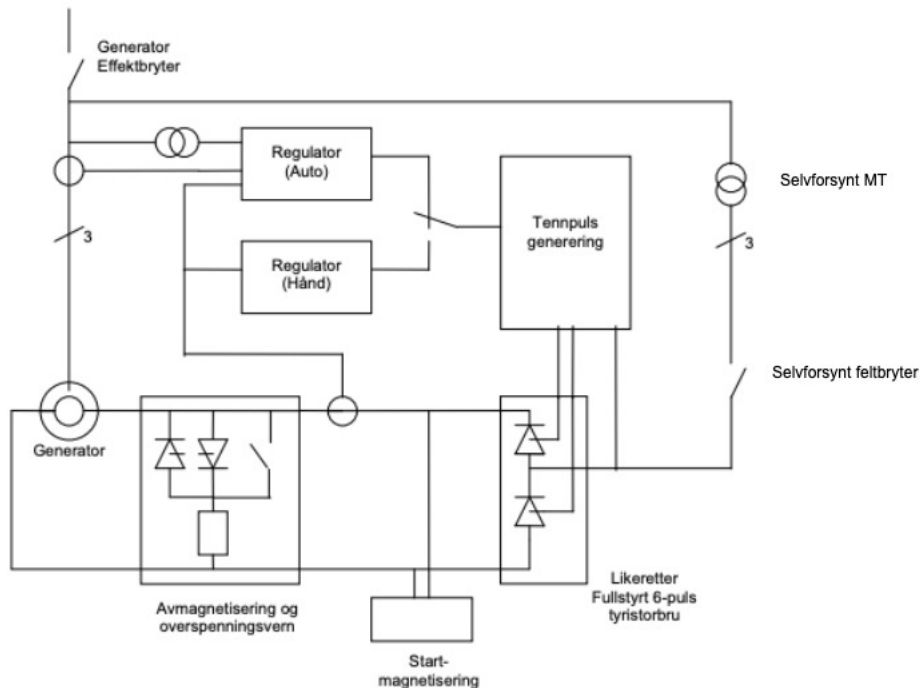
Stoppforløpet som bruker lengst tid er fri spinn uten mekanisk brems. Fri spinn vil si det ikke er noen aktive bremsemomenter som bremser rotor. Før generatoren begynner stopp-prosessen er det viktig å spesifisere prosessen fra nominell drift for å få et oversiktlig innblikk av hvordan dette utføres i praksis. Fra nominell drift lukkes innslippsmekanisme til turbinen gradvis ned til turbinen er ubelastet, altså tomgang. Gradvis lukking av innslippsmekanisme forhindrer tilfellet av vannhammer som kan føre til defekter. Når generatoren opererer under tomgang, kan effektbryter mot stivt nett kobles ut. En konsekvens av at effektbryter kobles ut før tomgang er at turbinen tilføres ekstra kraft som gjør at turtallet til turbinen økes ytterligere, altså opprusing av turtall. Etter utkobling av effektbryter, kan innslippsmekanisme til turbinen gradvis stenge slik at vanntilførselen er fullstendig lukket og selve stoppforløpet kan begynne.

Fri spinn kan deles opp til tre ulike tilstander som påvirker stoppforløpet. Første tilstand er avmagnetisering av selvforsynt magnetiseringsutstyr; I denne perioden vil turbinen oppleve ekstra energitap av at magnetiseringen fortsatt er til stede. Avmagnetiseringen av selvforsynt magnetiseringsutstyr skjer først etter et forhåndsbestemt turtall, hvor feltbryteren kobles ut. Andre tilstand er et forløp uten tilleggsmomenter; Generatoren har ingen ekstra aktive momenter som forkorter bremseforløpet. Tredje tilstand er mekanisk brems; Hvis generatoren ikke har installert mekanisk brems, utgår denne delen og turbinen fortsetter i andre tilstand til stillestand. Dersom generatoren har installert mekanisk brems vil denne aktiveres ved forhåndsbestemt turtall. Mekanisk brems vil raskt stoppe generatoren til stillestand. Når generatoren er i stillestand, vil hjelpesystem og pumper slås av etter en gitt tid.

En nummerert liste over stopp-prosess i fri tilstand med og uten mekanisk brems:

1. Stenge innslippsmekanisme til null belastning av turbin. Dette er for å forhindre opprusing av turtall
2. Frakoble effektbryter mot ytre nett
3. Stenge innslippsmekanisme
4. Avmagnetisering av rotor etter innstilt turtall og utkobling av feltbryter. Se Figur 22
5. Innkobling av mekanisk brems hvis dette er installert
6. Vent til stillestand, deretter slå av hjelpesystemer og pumper etter angitt tid

## 2.7 Stoppmetoder for vannkraftverk



Figur 22: Fri spinn. Selvforsynt feltbryter koblet ut [7]

### 2.7.3 Kortslettet statormetodikk

Den klassiske bremsemetodikken som benyttes på moderniserte anlegg er kortslettet statormetodikk, også kalt elektrisk brems. Den mest effektive metoden for nedbremsing av generator. Kortslettet statormetodikk består av et eksternt installert bremsesystem. Komponentene til bremsesystemet inneholder en eksternt forsynt MT og en kortslutningsbryter i statoruttak. Den eksterne MT forsynes kun fra ytre nett, og tilkobles mellom generatorens MT og likeretter. I dette tilfellet er da en feltbryter for selvforsynt magnetisering og en feltbryter for eksternt MT som er uavhengig av hverandre. En konstant feltstrøm påføres mot feltviklingene som blir magnetisert og skaper magnetfelt mot ankerviklingene. Kortslutningsbryteren i statoruttaket er en robust bryter som kortslutter lederne ut fra stator. Kortslutningen i ankerviklingene vil da oppfattes som et aktivt moment i motsatt retning av generatorens normale rotasjonsretning. Mot momentet skaper en bremseeffekt som aktivt stopper aggregatet. Med kortslettet statormetodikk begynner bremseforløpet fra nominell drift hvor innslippsmekanisme til turbin gradvis lukkes for å oppnå tomgangsdrift. Deretter utkobles effektbryter mot ytre nett, så stenges innslippsmekanisme gradvis slik at vanntilførselen er fullstendig lukket og bremseforløpet kan iverksettes. En grundigere forklaring av dette ble gjennomgått under kapittel 2.7.2.

Kortslettet statormetodikk har fire ulike tilstander som påvirker stoppforløpet. Første tilstand er avmagnetisering av selvforsynt magnetiseringsutstyr; I denne

## 2.7 Stoppmetoder for vannkraftverk

---

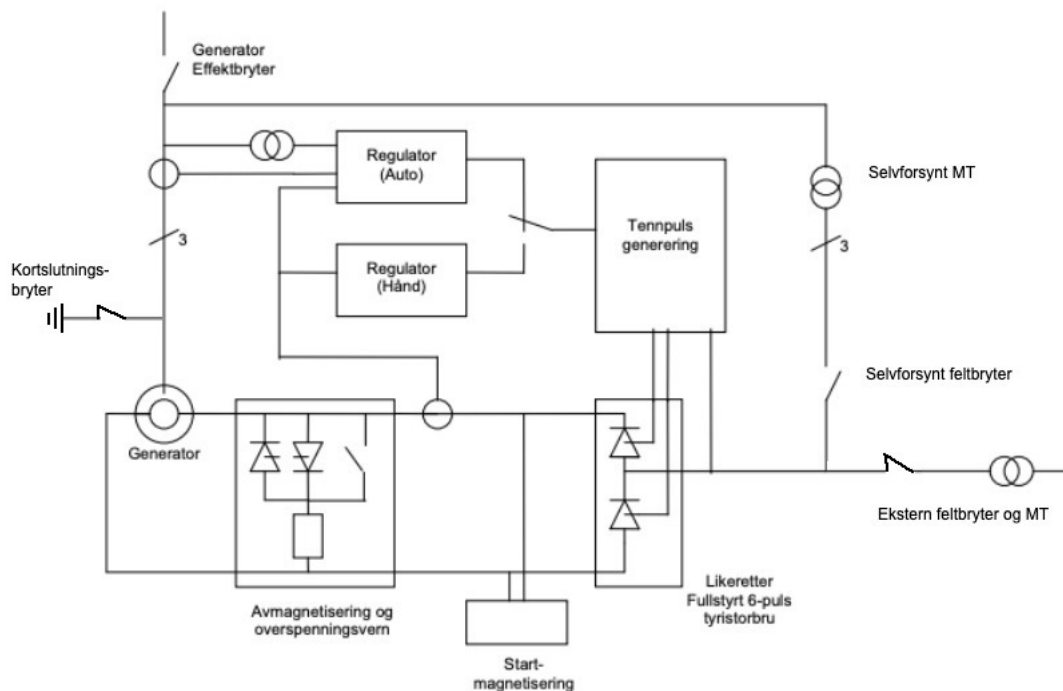
perioden vil turbinen oppleve ekstra energitap av at magnetiseringen fortsatt er til stede. Avmagnetiseringen av magnetiseringsutstyr skjer etter et forhåndsbestemt turtall, hvor feltbryteren til selvforsynt magnetisering kobles ut. Andre tilstand er innkobling av eksternt magnetiseringssystem og kortslutningsbryter i stator. Det eksterne magnetiseringssystemet aktiveres ved at eksternt feltbryter legges inn. Kortslutningsbryter til stator kobles inn og elektrisk brems er nå aktiv. Tredje tilstand er utkobling av eksternt magnetiseringssystem og kortslutningsbryter i stator; Elektrisk brems kobles ut før mekanisk bremseprosess utføres. Fjerde tilstand er innkobling av mekanisk brems; Mekanisk brems kobles inn etter ønsket turtall. Generator går til stilletilstand, hjelpesystemer og pumper slås av etter angitt tid.

En nummerert liste over stopp-prosess ved kortsluttet statormetodikk:

1. Stenge innslippsmekanisme til null belastning av turbin. Dette er for å forhindre opprusing av turtall
2. Frakoble effektbryter mot ytre nett
3. Stenge innslippsmekanisme
4. Avmagnetisering av rotor etter innstilt turtall og utkobling av feltbryter for selvforsynt system
5. Innkobling av eksternt MT til elektrisk brems og innkobling av kortslutningsbryter i statorutgang til elektrisk brems. Se Figur 23
6. Utkobling av elektrisk brems. Eksternt MT og kortslutningsbryter
7. Innkobling av mekanisk brems
8. Vent til stillestand, deretter slå av hjelpesystemer og pumper etter en gitt tid



## 2.7 Stoppmetoder for vannkraftverk



Figur 23: Kortsluttet statormetodikk. Ekstern feltbryter og MT kobles inn, sammen med kortslutningsbryter i statoruttak, [7]

### 2.7.4 Åpen statormetodikk

En alternativ løsning som blir undersøkt er åpen statormetodikk, den blir omtalt som forenklet elektrisk brems. Åpen statormetodikk er tiltenkt generatorer som ikke har installert en klassisk elektrisk brems og har lang stopptid. Systemet kan potensielt bespare store kostnader i forhold til innkjøp av elektrisk brems. Til gjengjeld er det forutsett at en forenklet elektrisk brems vil ha en effektivitet mellom fri spinn og kortsluttet statormetodikk løsningene. Dette kan være en løsning for generatorer  $\geq 100\text{MVA}$  som per dags dato har lengre stopptid enn 15 minutter, samt optimalisere forbruksmønsteret til andre generatorer uten elektrisk brems. Åpen statormetodikk går ut på at generatoren ikke avmagnetiseres og feltbryter til selvforsynt magnetiseringssystem ligger inne under bremseforløp. Systemet benytter den kinetiske energien i rotor til å opprettholde klemmespenningen. Dette utnytter bremsemomentet fra tap i aggregatet. Målet er å kunne forkorte bremsetiden uten å tilføre aggregatet komponenter som krever omfattende inngrep. For å få til dette må logikken samt parameterene til ulike komponenter analyseres. Med åpen statormetodikk begynner bremseforløpet fra nominell drift hvor innslippsmekanisme til turbin gradvis lukkes for å oppnå tomgangsdrift. Deretter utkobles effektbryter mot ytre nett, så stenges innslippsmekanisme gradvis slik at vanntilførselen er fullstendig lukket og bremseforløpet kan iverksettes. En grundigere forklaring av dette ble gjennomgått under kapittel 2.7.2. Ved forenklet elektrisk brems vil da det selvforsynte

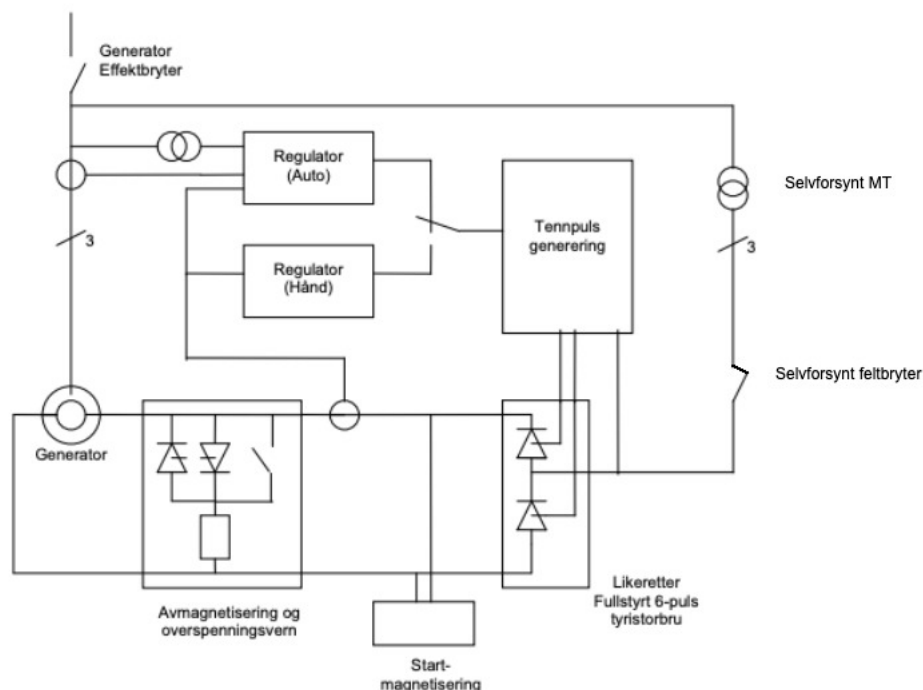


## 2.7 Stoppmetoder for vannkraftverk

magnetiseringssystemet være innkoblet gjennom store deler av bremseforløpet, helt til mekanisk brems påføres. Generator går til stilletilstand, hjelpesystemer og pumper slås av etter en gitt tid.

En nummerert liste over stopp-prosess ved åpen statormetodik:

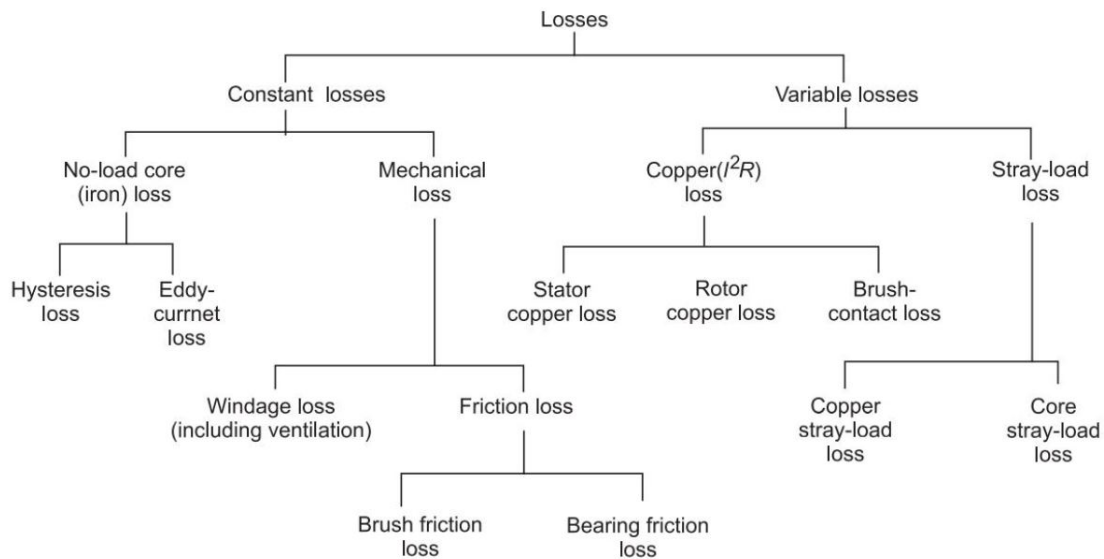
1. Stenge innløpsventil til null belastning av turbin. Dette er for å forhindre opprusing av turtall
2. Frakoble effektbryter mot ytre nett
3. Lukke innslippsmekanisme fullstendig
4. Holde feltbryter innkoblet under stoppforløp. Se Figur 24
5. Avmagnetisering av rotor etter innstilt turtall og utkobling av feltbryter for selvforsynt system
6. Innkobling av mekanisk brems
7. Vent til stillestand, deretter slå av hjelpesystemer og pumper etter en gitt tid



Figur 24: Åpen statormetodik. Selvforsynt feltbryter holdes inne under bremseforløp, [7]

## 2.8 Tap i en synkrongenerator

Synkrongeneratoren har mekaniske og elektriske varmetap, i dette underkapitlet skal disse tapene identifiseres for så en beskrivelse av hvordan de presenteres. Energiomformingen som skjer i en roterende maskin, involverer strømmer og flukser som skaper tap i ledere og ferromagnetisk materialer. Mens den fysiske rotasjonen gir mekaniske tap i rotasjonen. Tapene fordeles som vist i Figur 25. Tapene deles inn i to hovedgrupper; Konstant tap og variable tap. Hvor de konstante tapene igjen blir delt i mekaniske tap og tomgangstap, sistnevnte er også kjent som jerntap. Mens variable tap holder seg til kobbertap [8].



Figur 25: Klassifikasjon av tap i en roterende maskin, [8]

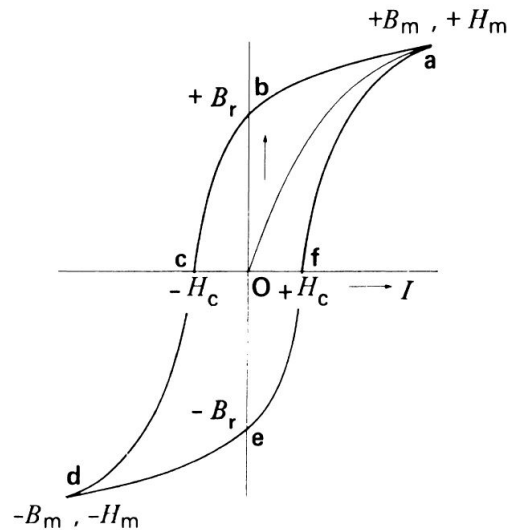
### 2.8.1 Konstante tap

Tapene som er tilnærmet konstante ved normal drift kalles konstante tap (noen av disse tapene vil ha varierende verdier, men regnes som konstante innenfor maskinens virkeområde). De består av tomgangstap, også kalt jerntap og mekaniske tap som vist i Figur 25. Tapene er avhengig av fart og spenning som vil holdes konstante ved normal drift [8]. En synkronmaskin holder en tilnærmet konstant fart og spenning som er fastsatt av stivt nett.

Jerntap består av hysterestetap og virvelstrømtap. Disse tapene oppstår når flukstettheten endres i jernkjernen til en maskin når kun hovedviklingene er magnetisert. Jerntapet er primært i statoren i en synkronmaskin [8]. Siden en synkrongenerator opererer med vekselstrøm, vil fluksen i jernet i maskinen variere i både verdi og retning. Denne variasjonen er avhengig av frekvens. I Figur 26 vises en elektrisk hystereseurve, i kurven vil fluksen bevege seg i rekkefølgen;  $+B_m, +B_r, 0, -B_m, -B_r, 0$  og tilbake til  $B_m$ . Den vil gjennomføre denne syklusen hver  $\frac{1}{f}$  av et

## 2.8 Tap i en synkrongenerator

sekund. Arealet av kurven den former er energien den absorberer, eller tapet den produserer i hver syklus. Dette tapet vil tilsvare et varmetap [11].



Figur 26: Hysteresekurve, [11]

Basert på eksperimentelle studier kan hysterestetapet framstilles med en empirisk formel:

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^n \quad (5)$$

Hvor  $k_h$  er konstant knyttet til materialet i jernkjernen,  $B_m$  er maksimal flukstetthet og  $n$  er Steinmetz eksponenten. ( $n$  varierer mellom 1.5 og 2.5 avhengig av material. Men ofte brukes 1.6) [8]

Variierende magnetfelt fører til kjernetap for blant annet elektriske maskiner og for transformatorer. I en synkronmaskin blir forskjellige deler av maskinen påvirket av varierende flukser. Stator blir påvirket av et varierende magnetfelt fra rotor og fra viklingene i stator. Når for eksempel et magnetisk ledende objekt utsettes for et eksternt varierende magnetfelt vil objektet sette opp interne strømmene. Disse interne strømmene setter opp et magnetfelt som er motsatt rettet av det eksterne feltet. Dette skjer naturlig da naturen alltid prøver å oppnå likevekt. De interne strømmene kalles virvelstrømmer og når de sirkulerer i materialer med elektrisk motstand oppstår det varmeenergi i objektet. For å redusere størrelsen på virvelstrømmer blir for eksempel stator i elektriske maskiner delt opp i tynne lamineringslag. Dette gjør at det kontinuerlige materialet feltet kan påvirke blir mindre, slik at de induserte virvelstrømmene som oppstår blir mindre [27].

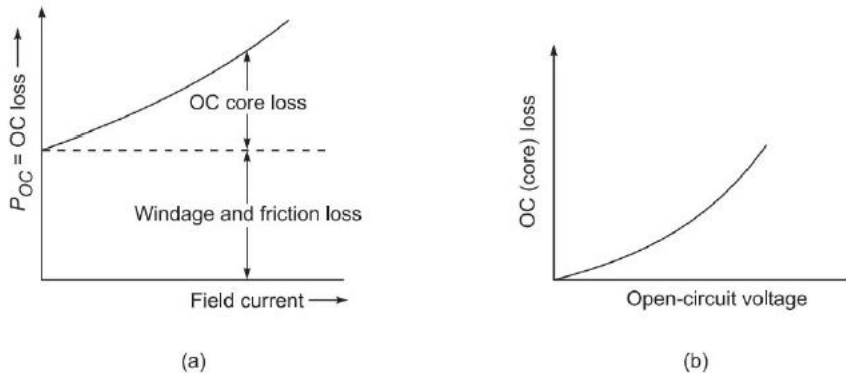
Virvelstrømstapet kan bli uttrykket med empirisk formel:

$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (6)$$

Hvor  $k_e$  er konstant knyttet til materialet i jernkjernen,  $f$  er frekvens, og  $B$  er flukstetthet. Det er kun i akademiske øvelser jernetapet separeres i de to overnevte komponentene [8].

## 2.8 Tap i en synkrongenerator

Mekanisk tap, også kalt tomgangs rotasjonstap omhandler lagertap og ventilasjonstap [8]. De mekaniske tapene beregnes ved å gjennomføre den praktiske testen kalt tomgangstest eller åpen krets test. Fra denne testen identifiseres tomgangs-jerntap samt ventilasjon- og friksjonstapene, som vist i Figur 27a. Ved å sette feltstrømmen lik null separeres de konstante mekaniske tapene fra jerntapene. Resterende jerntap består av hysterestetap og virvelstrømstap som varierer med 1.6 i potens av tomgangsspenningen [8] som vist i Figur 27b.



Figur 27: a) Tomgangstap vs. feltstrøm, b) Tomgangstap vs. tomgangsspenning. [8]

### 2.8.2 Variable tap

De variable tapene oppstår på grunn av at maskinene optimalt vil være tilkoblet en eller annen komponent som den leverer last til. Kobbertapene er ohmsk tap i viklinger, som består av kobberledere. Når strømmen er høy i viklingene vil tapet være av betydning. Viklingene kan også erstattes med kobberstaver, dermed er det mer nøyaktig å beregne kobbertapet basert på vekten av kobberet i maskinen. Kobbertapene kan igjen deles inn i stator-, rotor- og børste-kobbertap. De nevnte tapene er proporsjonale med kvadratet av strømmen og regnes med en DC-resistans i viklingen ved 75 °C. I denne fordelingen er det også tilleggstap som omhandler

- Kobber-tilleggstap - Tap som oppstår i lederne på grunn av ikke-uniform distribusjon av vekselstrøm som øker den effektive resistansen i lederen, også kalt skin-effekt. Dette tapet omhandler også virvelstrømmer som oppstår i tennene i en mettet jernkjerne. Metningen oppstår på grunn av at mer fluks passerer ned sporene og gjennom kobberlederne.
- Jern-tilleggstap - Oppstår på grunn av strømmen i maskinen, fluksmønsteret i tennene og jernkjernen blir forvrengt. Her blir flukstettheten minnet i den ene enden av flukstetthetsbølgen og økt i andre enden. Siden jerntapet er nesten proporsjonal med kvadratet av flukstettheten vil det være en økning av jerntap i tennene.

Ved full last vil tennene ha en høy grad av metning, dette resulterer i flukslekkasje i statorblikket som forårsaker virvelstrømtap. Tilleggstepene er vanskelig å beregne nøyaktig og en praktisk antakelse som blir brukt er 0.5% av effektuttaket i synkronmaskiner [8].

Kobbertapene fastslås ved å gjennomføre en kortslutningstest. Under testen vil generatoren være betraktelig undermagnetisert og tapene vil bli tatt fra akslingen og dermed bestå av mekaniske tap og kobbertap i resistansen i stator, her er jerntap neglisjert [8].

## 3 Metoder

I metoder vil en oversikt over hvordan teorien er blitt brukt i simuleringen, hvilke forenklinger som er tatt, begrensninger gruppen har forholdt seg til samt valgene som har formet simuleringens oppsett og sammensetning bli presentert. Først blir de begrensninger gruppen har møtt og måttet forholde seg til presentert. Så kommer den forståelse for hvordan MathWorks Simulink opererer som trengs for å forstå valgene gjort, samt forklaring på de ulike komponentene brukt. Deretter følger forklaring på bruken av MathWorks Matlab og Microsoft Excel og deres rolle i modellen. Etterfølgende forklares de ulike seksjonene i simuleringen fra oversikt til detalj. Hvorfor feltstrømmkurven ser ut som den gjør og hva det baserer seg på, samt valgene bak. Hvilke tap som er med i de ulike stoppmetodikkene og hvorfor de er beregnet som de er.

### 3.1 Begrensninger

Åpen statormetodikk er avhengig av at magnetiseringsystemet og dets komponenter takler de lave frekvensene nedbremsingen vil påføre. Generatoren og MT sin evne til å tåle høye fluksverdier, forholdet mellom sekundærspenning og feltspenning, samt et kontrollkort for likeretteren begrenser mengden og hvor lenge magnetiseringen kan opprettholdes.

Det faktumet at det designes egne transformatorer for variabel frekvens får gruppen til å tro at det kan være en effekt av frekvensendring på MT. Kombinasjonene av mangel på transformatordata og, så vidt gruppen ser, mangelen på undersøkelser av effekten varierende frekvenser har på fast frekvens transformatorer, FFTer. Har sammen med at ingen nøyaktig modellering av frekvensens effekt er mulig utenom å gjøre eksperimenter [8], ført til at gruppen har sett på en ideell situasjon der det er ingen effekt fra frekvensendring på MT og understreker at dette må undersøkes videre før ideen kan testes i praksis. Resultatet av beslutningen er at forholdet mellom primær og sekundær  $a$  forblir konstant med frekvensendring. Det skal bemerkes at

etter utredning av formel 3 fra kapittel 3.3 i [8] kan det tydes at ( $a$ ) ikke endres med frekvens.

Etter Ohms lov vil feltstrømmen følge feltspenningen proporsjonalt. Dermed, så lenge MT kan supplere en AC spenning høyere enn feltspenning/1.33 (se formel 2), vil likeretteren klare å supplere feltstrøm til rotor. Siden klemmespenning faller proporsjonalt med feltstrømmen utenfor metning, og  $a$  er konstant, vil sekundærspenningen også falle proporsjonalt med feltstrømmen. Dermed vil forholdet mellom sekundærspenningen og feltspenningen falle proporsjonalt. Om MT da kan gi nok spenning i tomgang vil MT kunne forsyne nok spenning gjennom hele bremseforløpet.

En synkende frekvens vil forlenge tiden hver tyristor leder i likeretteren, men ikke endre dens evne til å opprettholde feltspenningen. Formel 2 viser ingen avhengighet av frekvens. Å gå fra 50Hz AC til 10Hz AC forlenger tiden hver fase leder med en faktor  $50/10 = 5$ , og kan resultere i at utjevneskondensatoren ikke har nok energi lagret til å opprettholde spenningen. Selv ved 1Hz vil det være 6 spenningstopper pr sekund og det magnetiske feltet i rotor vil ikke betydelig påvirkes. Undersøkelse av dette er utenfor gruppens mulighet, men burde undersøkes før ideen testes.

Det er også et lite kontrollkort som avgjør om likeretteren har nok spenning til å gjennomføre sin oppgave. Ned til slik detalj har ikke gruppen hatt mulighet til å gå. Det er derfor gått ut ifra at et slikt kort begrenser likeretteren, og skrur av magnetiseringen, ved 20% frekvens. Da vil begrensningen slitasje av platinabelegget på sleperingen ved lave frekvenser forhåpentligvis bli dekket, men dette er også for detaljert til at gruppen har hatt forutsetninger for undersøkelser.

For å forhindre varmoppbygning i det ferromagnetiske materialet er maks fluks i generator og MT begrenset. Begrensningen benyttet er  $1.15 * \phi_N$  [28]. Satt inn i formel 4 vil det gjøre at spenningen kan ligge 15% høyere enn normalen ved en gitt frekvens. Dette vil gi muligheten til å presse feltstrømmen opp til den fluksen hvor metning oppstår i det ferromagnetiske materialet. Under metning må det mer feltstrøm til for å oppnå samme økning i spenning. Dermed kan feltstrømmen økes og direkte øke tapene.

## 3.2 Modellen

Simulink er et simuleringsverktøy bygd på MathWorks Matlab. Simulink bruker diagrammer og matematiske uttrykk for å visuelt vise og prosessere systemer. Blokkdiagrammer gir en forståelig visning av modellen som er ønsket å simulere ved å gi hver blokk en enkel funksjon i modellens matematiske uttrykk samt signallinjer mellom blokkene for å visuelt knytte funksjonene sammen. Simulink kan hente informasjon fra, samt skrive til, Matlabs "base workspace". Mens Matlab kan hente data fra og skrive til Excel, hvor bruker kan taste inn ønsket data og lese resultatet.

Dette er bakgrunnen bak prosjektets modell. Alternativt modelleringsverktøy i DigSILENT Powerfactory ble vurdert, men det ble konkludert med at Powerfactory ikke var detaljfokusert nok og mer egnet til større kraftnettanalyser. Det er også vurdert at modellen kan skrives om til Python, men dette forslaget kom sent i prosjektperioden og gruppen har ikke disponert tid til å undersøke eller gjennomføre det.

Komponentene brukt i Simulink er oppført i vedlegg 10 med figur og forklaring.

Matlab er en programvare som kombinerer et brukervindu optimalisert for gjentakende analyser og et programmeringsspråk basert på matriser og rekker [29]. Det er et veldig stort og kapabelt verktøy, men gruppen bruker kun enkel programmering som trolig kunne blitt gjort i Python, det er hovedsakelig tilknytningen til Simulink som avgjør valget av Matlab. Tilknytningen betyr at Matlab oppfører seg som bindeleddet mellom Simulink og brukerens inntasting i Excel. Matlab er for brukeren kun et program de må ha åpent for å kjøre simuleringen.

Excel er et regneark laget for oversiktlig fremvisning av data samt grunnleggende programmering. Det er nettopp Excels oversiktlige natur og kompatibilitet med bla. Matlab som er bakgrunnen bak gruppens valg, samt at programmet er såpass vidkjent at en kan regne med brukeren er kjent med hvordan det fungerer. For brukeren er Excel stedet de skriver inn data og mottar resultatet når simuleringen er ferdig. Filen er fargekodet og består av minimalt med programmering for fremtidig kompalabilitet.

Simuleringen omhandler tidsforløpet fra aggregatet er frakoblet det utenforliggende kraftnettet og eventuell opprusing har forekommet til fullstendig stopp eller en mekanisk brems tar over. Nedbremsingsforløpet er da antatt å starte med nominelle verdier for turtall ( $\omega_n [rad/s]$  eller  $n_n [rpm]$ ), og frekvens  $f_n = 50Hz$ . Aggregatet har i starten av tidsforløpet en kinetisk energi lik en halv ganget med treghetsmomentet til generatorens roterende deler og vinkelfrekvensen opphøyd i andre, se formel 7. Treg-hetsmomentet til turbinen er så lite at den ikke er oppgitt i teknisk data til anleggene. Generatorens roterende deler blir derfor heretter bare referert til som rotor.

Rotor kan stoppe på fire tidligere nevnte stoppmetoder, se kapittel 2.7. Nødbrems er naturligvis ikke simulert da det ikke er en stoppmetode brukt utenom i nød. Alle de tre andre metodene er simulert samtidig slik at sammenligning er enkelt. Selv aggregater uten elektrisk brems har et grovt estimat på stopptid ved elektrisk brems basert på verdier fra andre anlegg med elektrisk brems. Felles for alle stoppmetodene i simuleringen er at de nominelle tapene blir skalert ned etter både feltstrøm og turtall eller en av dem. Hvordan de blir skalert ned blir forklart senere i dette kapitlet. De nedskalerte tapene blir for hvert tidsteg lagt inn i formel 8 sammen med vinkelfrekvensen tapene ble beregnet ved for å få hvor mye vinkelfrekvensen skal synke med til neste tidsteg. Denne prosessen repeteres helt til simuleringstopp og starter i integrasjonsblokken med nominell vinkelfrekvens samt tomgangs-feltstrøm (mer om feltstrømmen senere).

Lengden på hvert tidsteg bestemmer Simulink ved bruk av innebygde "Solve".

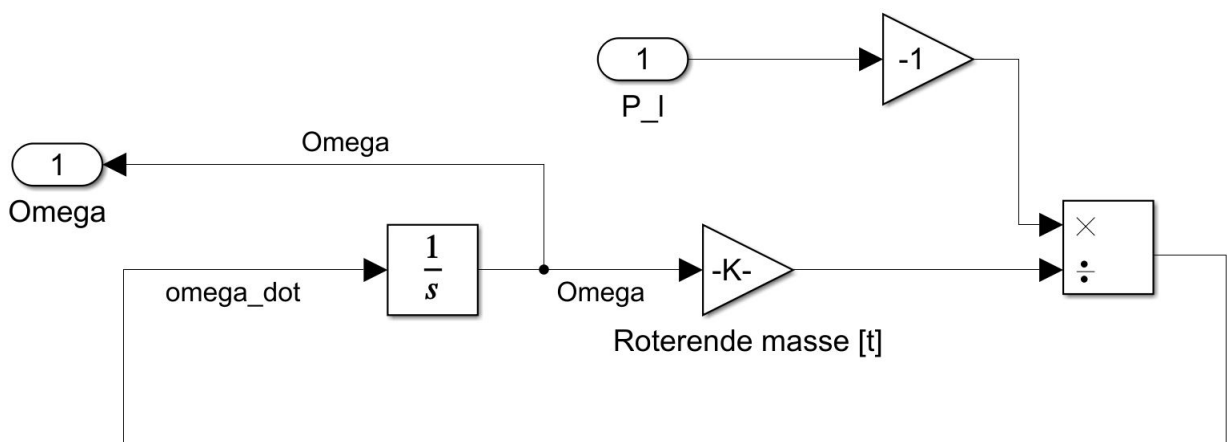


### 3.2 Modellen

”Solver” er en algoritme som simulerer et dynamisk system, hvor systemets tilstander i påfølgende tidsteg blir beregnet gjennom å løse et sett med første ordens differensialligninger som representerer modellen. Simulink gir tilgang til flere låst-steg og varierende-steg algoritmer som benytter forskjellige numeriske integrasjonsmetoder for å løse første ordens differensialligninger. Varierende-steg algoritmene varierer steglengden basert på treffsikkerheten på beregningen av neste steget. Bommer beregningen for mye senker algoritmen neste steglengde slik at ved raske endringer er det mange korte steg og ved trege endringer er det få og lange steg. Selv om hvert steg må vurderes kan det drastisk redusere antall steg og dermed bruke mindre datakraft [30]. For bremseforløp hvor det er store endringer i energien ved start og små nærmere slutten er varierende-steg solvere best. Gruppen lar også Simulink bestemme integrasjonsmetode selv. Vinkelfrekvensberegningen vist i Figur 28 er prosjektets første ordens differensiallikning som valgte algoritme bruker samt at den representerer simulinks oppsett av formel 8.

$$\frac{1}{2}J\omega^2 \quad (7)$$

$$\dot{\omega} = \frac{-P_l}{J\omega} \quad (8)$$



Figur 28: Rotasjonsfart avhengig av tid, grafisk tegnet i Simulink

Rotasjonsmasse er den moderne måten å beregne kinetisk energi på. Grunnet alderen på mange vannkraftverk kan svingmasse ha blitt brukt. Konverteringen skjer enkelt ved å dele oppgitt svingmasse på fire. [31], se formel 9.

$$J = \frac{GD^2}{4} \quad (9)$$

Følgende er utledningen for formel 8. Hvor formel 11 er generell formel for vinkelfrekvensen til vannkraftverk. Her er  $T_{turbin} = 0$  fordi vanngangen er fullstendig



### 3.2 Modellen

stengt. En vet at effekt er likt dreiemoment ganget med vinkelfrekvens ( $P = T \cdot \omega$ ). Vris formelen om blir den gitt ved formel 13.  $P_l$  er summen av alle de individuelle tapene beskrevet i kapittel 3.3. Se formel 10.

$$P_l = P_{Fe.Hys} + P_{Fe.Virv} + P_{Lager} + P_{Vent} + P_{Cu,Stator_K} + P_{mag,tom} + P_{mag.ut} \quad (10)$$

$$\omega = \int \frac{1}{J} \cdot (T_{turbin} - T_{levert}) dt \quad (11)$$

↓

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -T_{levert} \quad (12)$$

$$T_{levert} = \frac{P_l}{\omega} \quad (13)$$

Sett inn formel 13 i 12

$$J\omega\dot{\omega} = -P_l \quad (14)$$

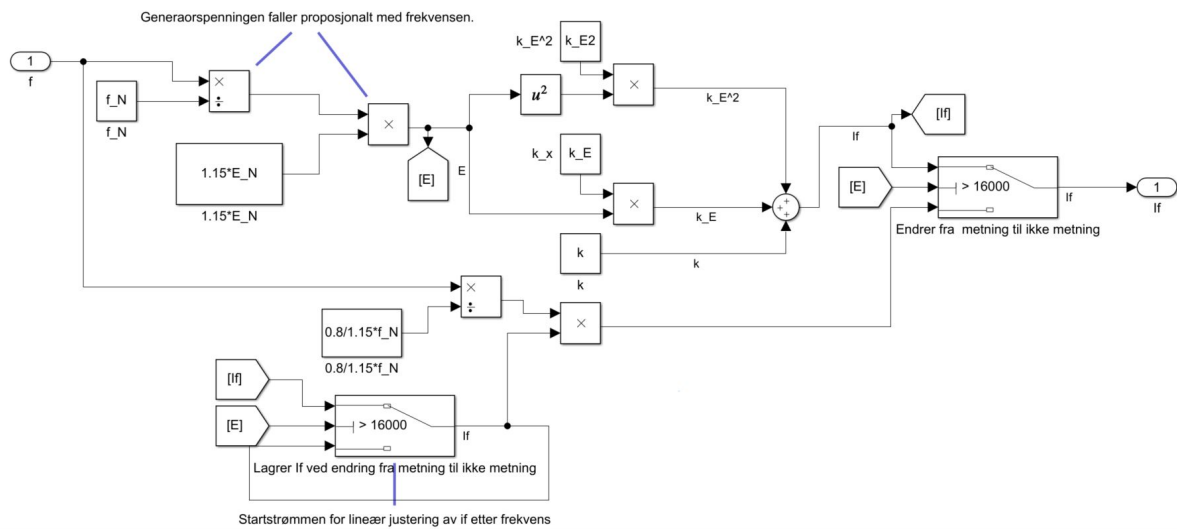
↓

$$\dot{\omega} = \frac{-P_l}{J\omega} \quad (15)$$

Sammen med vinkelfrekvensen er det feltstrømmen som styrer verdiene i simuleringen. Feltstrømmen er proporsjonal med spenningen når stator er i umettet tilstand og følger en estimert kurve basert på tomgangskararakteristikken til generator for mettet tilstand. Er tomgangskararakteristikken ikke tilgjengelig holder feltstrømmen oppgitt tomgangsverdi frem til metningsgrensen vurdert til 80% av merkespenning er nådd, hvor feltstrømmen følger spenningen proporsjonalt. Vurderingen er satt basert på sensitiv data gruppen har hatt tilgang til samt grafen i følgende kilde [11]. Som nevnt i kapittel 3.1 er det et overmagnetiseringsvern som slår inn på 115% av nominell fluks. Fluksen beregnes etter formel ?? derav formel ?? . Vri om på formelen og dermed får feltstrømmen en verdi som gir en spenning 115% høyere enn normalt ved gitt frekvens. For å forenkle modellen har gruppen valgt å ikke inkludere det dynamiske forløpet til feltstrømmen.

Ved åpen statormetodikk brukes Matlab til å lage en tilnærmet 2.grads polynom av tomgangskararakteristikken med konstantene  $k_E^2$ ,  $k_E$  og  $k$ . Feltstrømmen blir

### 3.3 Tapene



Figur 29: Feltstrøm i åpen statormetodikk visualisert i Simulink

da et resultat av spenningen etter den tilnærmede funksjonen i mettet tilstand, mens i umettet tilstand følger den spenningens fall proporsjonalt. Generatoren avmagnetiseres når begrensningene nevnt i kapittel 3.1 blir nådd.

Kortsluttet statormetodikk og fri spinn avmagnetiserer feltstrømmen ved en gitt avmagnetiseringsfrekvens. Feltstrømmen følger samme kurve som ved åpen statormetodikk uten tomgangskaraktistikk tilgjengelig frem til avmagnetiseringsfrekvensen er nådd. I fri spinn sitt tilfelle forblir strømmen null, mens i kortsluttet statormetodikk slår den elektriske bremsen inn med sin gitte feltstrømsverdi.

Rapportens forfattere kan kontaktes om tilgang til modelleringsfilene.

### 3.3 Tapene

Tapene i generatoren benytter utregnet  $\omega$  og feltstrøm for å bestemme effektverdien til de forskjellige tapene ved de varierende rotasjonshastigheten og evnen til å magnetisere generatoren vha. feltstrømmen når hastigheten synker. I denne seksjonen skal utledingen av hvordan dette prosjektet tar for seg og beregner de ulike tapene gjennom bremseforløpet presenteres.

#### 3.3.1 Konstante tap

Ved et bremseforløp vil de konstante tapene i en synkrongenerator oppføre seg ulikt fra den ordinære måten å betrakte tapene på. Hovedgrunnen er at generatoren ikke lenger er i en tilstand der frekvens, indusert spenning og rotasjonshastighet er tilnærmet konstant, da den ikke er tilkoblet stivt nett. De konstante tapene blir dermed per

### 3.3 Tapene

definisjon variable. Oppdelingen i konstante og variable tap er for å samsvare med teorikapittelet 2.8.

#### Jerntap

Jerntapet blir i modellen fordelt som nevnt i kapittel 2.8 i hysteresesetap og virvelstrømstap. Disse tapene er krevende å modellere nøyaktig. Det er diverse faktorer som kan påvirke hvordan selve formelen skal se ut. Denne rapporten har tatt utgangspunkt i "Metode 1" gitt i [32].

$$P_{Fe} = P_h + P_{virv} + P_{exc} \quad (16)$$

Hvor  $P_{Fe}$  er jerntap,  $P_h$  er hysteresetap,  $P_{virv}$  er virvelstrømstap og  $P_{exc}$  er tilleggstap (Denne rapporten har utelukket tilleggstapet  $P_{exc}$ ).

Det er videre tolket at i tilfellene med flukstetthet  $B$ , kan det benyttes feltstrøm  $I_f$  da flukstettheten er direkte avhengig av feltstrømmen. Fra teorien om jerntap har prosjektet benyttet en fordelingskonstant for å enkelt fordele jerntap og virvelstrømstap gitt ved  $k_{Hys}$  og  $k_{Virv}$  for hysteresetap, og virvelstrømstap respektivt.

#### Hysteresetap

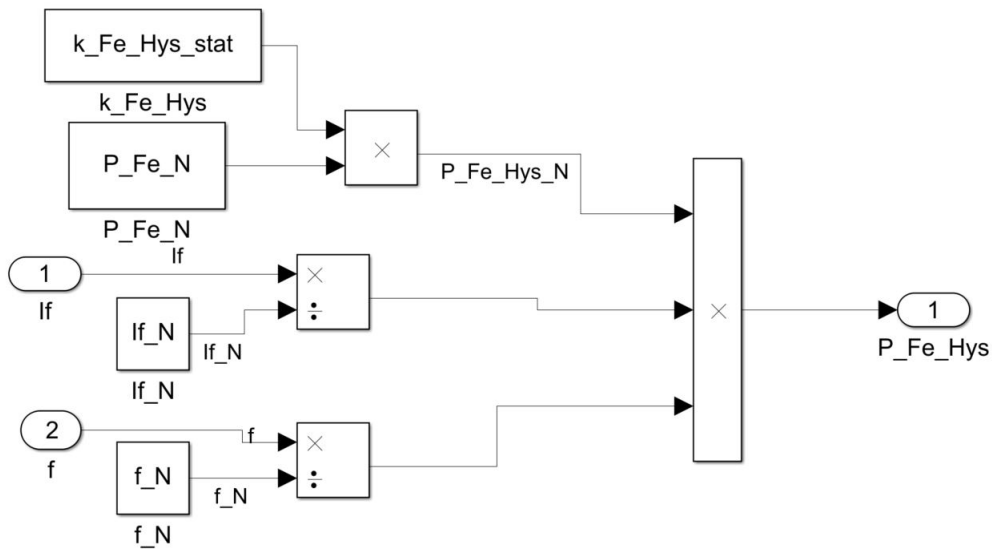
Formelen for nominelt hysteresetap som benyttes i modellen er dermed gitt ved:

$$P_{Fe.Hys,N} = P_{Fe,N} \cdot k_{Hys} \quad (17)$$

Hvor  $P_{Fe.Hys,N}$  er nominelt hysteresetap i stator.  $P_{Fe}$  er nominelt jerntap oppgitt i teknisk datablad,  $k_{Hys}$  er fordelingsfaktor av hysteresetap fra samlet jerntap. Fordelingen av jerntapet vil forbli konstant gjennom hele bremseforløpet. Selve hysteresetapet vil minske proporsjonalt med forholdet mellom feltstrøm og frekvens ved hvert tidssteg og deres nominelle verdi. Hysteresetapet ved hvert tidssteg er dermed gitt ved:

$$P_{Fe,Hys} = P_{Fe,Hys,N} \cdot \left(\frac{I_f}{I_{f,N}}\right) \cdot \left(\frac{f}{f_N}\right) \quad (18)$$

### 3.3 Tapene



Figur 30: Blokk skjema for hysteresetap i Simulink

#### Virvelstrømtap

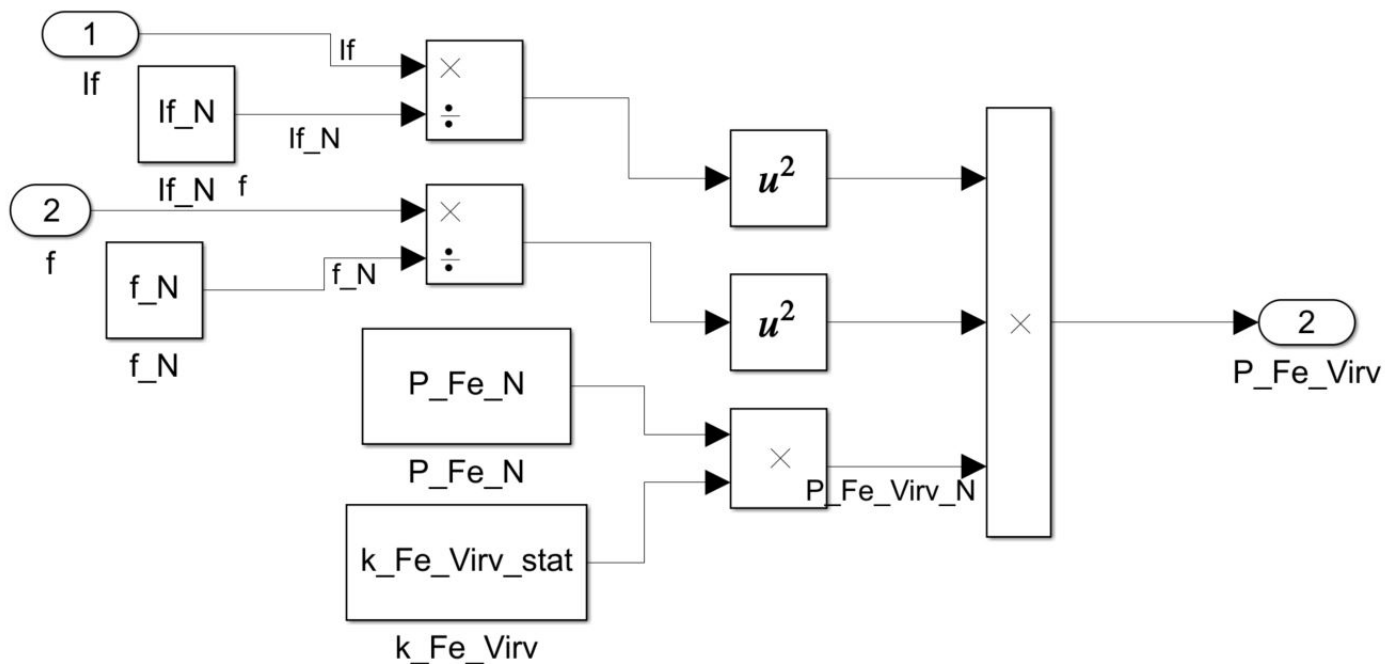
Modellen benytter formell 6 samt antagelsen om at fluksen er proporsjonal med feltstrømmen. Dermed blir virvelstrømtapet regnet ut som gitt i formell 19

$$P_{Fe, Virv} = (P_{Fe} \cdot k_{Virv}) \cdot \left(\frac{f}{f_N}\right)^2 \cdot \left(\frac{I_f}{I_{f,N}}\right)^2 \quad (19)$$

Hvor  $P_{Fe, Virv}$  er virvelstrømtap i stator.  $k_{Virv} = (1 - k_{Hys})$  er fordelingsfaktor av jern tapet som tilsvarer virvelstrømtap

Jerntapet er medregnet i samtlige bremsemetoder, men ved "Kortsluttet statormetodikk" og "Fri spinn" utgår tapet ved avmagnetisering.

### 3.3 Tapene



Figur 31: Blokkskjema for virvelstrømstap i Simulink

### Mekaniske tap

#### Lagertap

Lagertapet består av diverse konstante faktorer som er proporsjonale med turtallet, dermed kan formelen ?? forenkles til:

$$P_{Lager} = k_{Lager} \cdot \omega \quad (20)$$

Videre kan lagertapet beregnes som:

$$\frac{P_{Lager} = k_{Lager} \cdot \omega}{P_{Lager,N} = k_{Lager} \cdot \omega_N} \rightarrow P_{Lager} = P_{Lager,N} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_N}\right) \quad (21)$$

Nominelt lagertap er gitt ved nominell rotasjonshastighet. Tapet vil synke lineært med hastigheten  $\omega$ .

$$T_{Lager} = P_{Lager,N} \cdot \left(\frac{1}{\omega_N}\right) \quad (22)$$

$$P_{Lager} = T_{Lager} \cdot \omega = \left(P_{Lager,N} \cdot \left(\frac{1}{\omega_N}\right)\right) \cdot \omega = P_{Lager,N} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_N}\right) \quad (23)$$

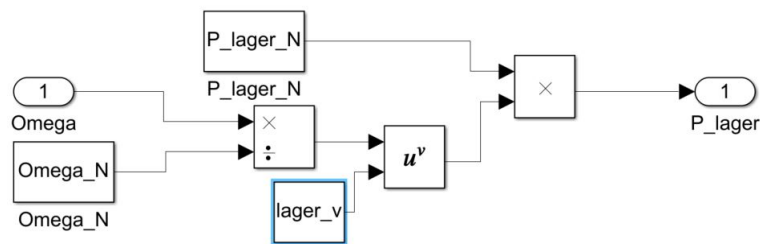
Videre er det lagt til en variabel gjør mindre justeringer av hvordan forholdstallet mellom  $\omega$  og  $\omega_n$  beregnes, dette er for å få utregningen til å passe for både "Større pelton

### 3.3 Tapene

anlegg” og ”Mindre pelton anlegg”, denne er gitt ved  $lager_v$  og kan justeres i Excel filen og blir nominelt satt til 1.3. Denne justeringen har liten effekt på prosentfordelingen av tapene, men vil ha en større effekt på den utregnede stopptiden. Ved denne justeringen blir det benyttet formel:

$$P_{Lager} = P_{Lager,N} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_N}\right)^{lager_v} \quad (24)$$

Hvor  $P_{Lager}$  er lagertap oppgitt i teknisk datablad med og uten ventilasjonstap inkludert.  $\omega$  er rotasjonshastighet[rad/s], og  $\omega_N$  er nominell rotasjonshastighet gitt i teknisk datablad.



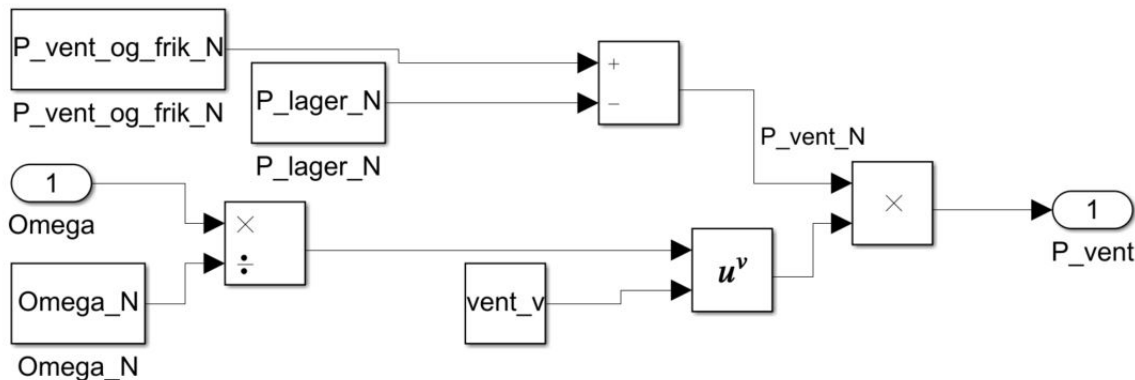
Figur 32: Blokkskjema for lagertap i Simulink

### 3.3 Tapene

#### Viftetap/Ventilasjonstap

$$P_{Vent} = (P_{Vent+Frik,N} - P_{Lager,N}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_N}\right)^{vent_v} = P_{Vent,N} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_N}\right)^{vent_v} \quad (25)$$

Hvor  $P_{Vent,N}$  er ventilasjonstap oppgitt i teknisk data sammen med  $P_{Lager}$ . Da lagertap også er oppgitt separat, subtraheres dette fra utregning av ventilasjonstapet.  $\omega$  er rotasjonshastighet[rad/s], og  $\omega_N$  er nominell rotasjonshastighet gitt i teknisk data. Ventilasjonstapet består av diverse konstante faktorer som er proporsjonal med



Figur 33: Blokkskjema for ventilasjonstap i Simulink

turtallet ved gitt potens  $vent_v$ , denne variabelen har noe usikkerhet knyttet til seg, men den er større en 2. I Excel arket kan denne variabelen justeres, men er nominelt satt til 2,2 slik at beregningen passer for "Større pelton anlegg" og "Mindre pelton anlegg". Dermed kan formelen ?? forenkles til:

$$P_{Vent} = k_{Vent} \cdot \omega^{vent_v} \quad (26)$$

Tapet kan da beregnes ved:

$$\frac{P_{Vent} = k_{Vent} \cdot \omega^{vent_v}}{P_{Vent,N} = k_{Vent} \cdot \omega_N^{vent_v}} \rightarrow P_{Vent} = P_{Vent,N} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_N}\right)^{vent_v} \quad (27)$$

Nominelt ventilasjonstap er gitt ved nominell rotasjonshastighet. Tapet vil synke ved  $vent_v$  potens med hastigheten  $\omega$ . Lagertap og Ventilasjonstap vil være til stede ved samtlige bremsemetoder i hele bremseforløpet.

#### 3.3.2 Variable tap

##### Kobbertap

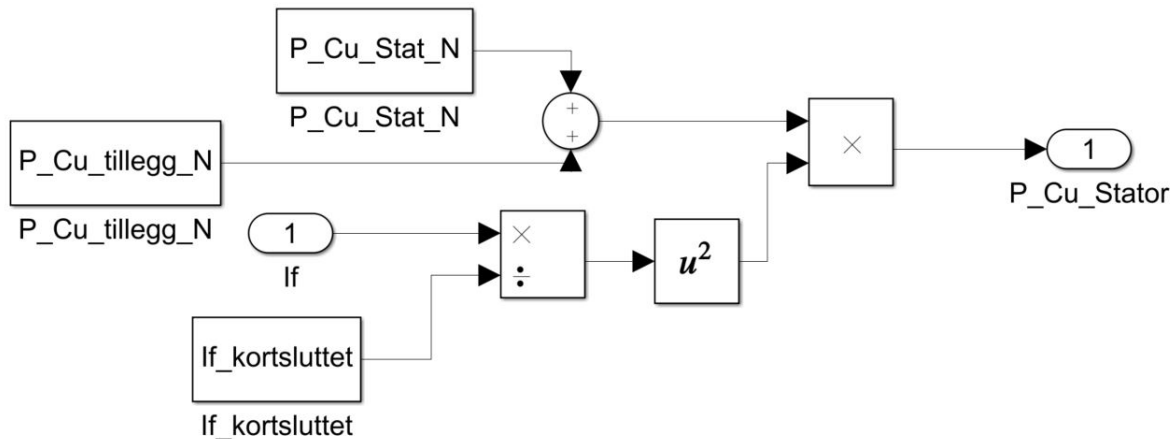
**Kobbertap ved kortsluttet stator** Tap som oppstår her er et ohmsk tap og er dermed avhengig av feltstrømmen kvadrert. Det er også summert med tilleggstap i kobber, det

### 3.3 Tapene

er knyttet noe usikkerhet til dette, men betraktes som et  $I^2R$ . Når stator er kortsluttet vil det også være et neglisjerbart tilleggsjerntap.

$$P_{Cu,Stator_K} = (P_{Cu,Stat,N} + P_{Cu,tillegg,N}) \cdot \left(\frac{I_f}{I_{f,N}}\right)^2 \quad (28)$$

Hvor  $P_{Cu,Stat,N}$ ,  $P_{Cu,tillegg,N}$  og  $I_{f,N}$  er oppgitte nominelle verdier for kobbertap i stator, tilleggstap og nominell feltstrøm respektivt.  $I_f$  er feltstrøm ved merkedrift gitt i teknisk datablad.



Figur 34: Blokkskjema for kortsluttet stator kobbertap i Simulink

I praksis vil tapet øke litt når kortslutning innføres. Da mates generatoren med en oppgitt kortslutningsstrøm gitt i teknisk datablad, som vil være noe høyere en  $I_f$ . Denne formelen vil gjelde så lenge  $X_s \gg R_{stator}$ , ( $X_s \approx 100 \cdot R_{stator}$ ). I blokkdiagrammet er kobbertapet i stator konstant hvis det er kortslutningsstrøm tilstede.

Kobbertapet i stator regnes som et rent ohmsk tap. Kallt  $RI^2$  tap. Der motstanden  $R$  er konstant og  $I$  i dette tilfellet er kortslutningsstrømmen,  $I_{f,K}$  som også vil være konstant siden feltstrømmen ved kortsluttet stator metodikk vil være fremmedmatet ved bremseforløpet, og vil da kunne holde konstant feltstrøm. Det brukes feltstrøm i beregningen istedenfor statorstrøm da strømmen blir brukt til å lage et forholdstall mellom strømmen tapet er målt ved og strømmen som går i roter ved gitt rotasjonshastighet.  $I_{f,K}$  er den feltstrøm som kreves for å opprettholde statorstrømmen på det nivået den var under nominell drift da tapene ble målt.

$$P_{Cu,Stator} = R \cdot I_{f,K}^2 \quad (29)$$

Dermed kan tapet beregnes ved:

$$\frac{P_{Cu,Stator} = R \cdot I_{f,K}^2}{P_{Cu,Stator,N} = R \cdot I_{f,K,N}^2} \rightarrow P_{Cu,Stator} = P_{Cu,Stator,N} \cdot \left(\frac{I_{f,K}}{I_{f,K,N}}\right)^2 \quad (30)$$

Dette tapet oppstår kun når generatorklemmene er kortsluttet i "Kortsluttet stator metodikk"

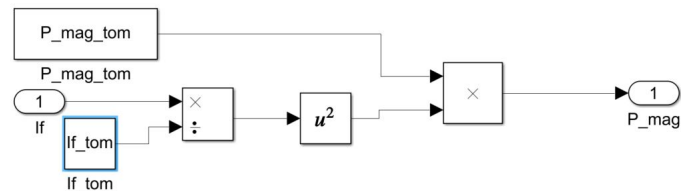


### 3.3 Tapene

#### Magnetiseringstap, tomgang

$$P_{mag,tom} = P_{mag,tom,N} \cdot \left(\frac{I_f}{I_{f,N}}\right)^2 \quad (31)$$

Hvor  $P_{mag,tom,N}$  er kobbertap i rotor, gitt ved merkedrift i datablad for generator.  $I_f$  er feltstrøm og  $I_{f,N}$  er Nominell feltstrøm gitt i datablad. Forholdet mellom feltstrøm og



Figur 35: Blokkskjema for magnetiseringstap i Simulink

nominell feltstrøm vil variere med feltstrømmen som synker ved nedbremsing. Ved start av nedbremsing vil dette forholdstallet være lik 1 og vil gi nominell magnetiseringstap ved tomgang. Når generatoren bremser vil feltstrømmen falle og tapet vil synke med fluksen (B) kvadrert, altså feltstrøm kvadrert.

Siden det er et rent ohmsk tap kan dette beregnes ved ohms lov:  $P = RI^2$ , hvor i dette tilfellet I er feltstrømmen i rotor  $I_f$ :

$$P_{mag,tom} = R \cdot I_f^2 \quad (32)$$

Dermed kan tapet beregnes ved:

$$\frac{P_{mag,tom} = R \cdot I_f^2}{P_{mag,tom,N} = R \cdot I_{f,N}^2} \rightarrow P_{mag,tom} = P_{mag,tom,N} \cdot \left(\frac{I_f}{I_{f,N}}\right)^2 \quad (33)$$

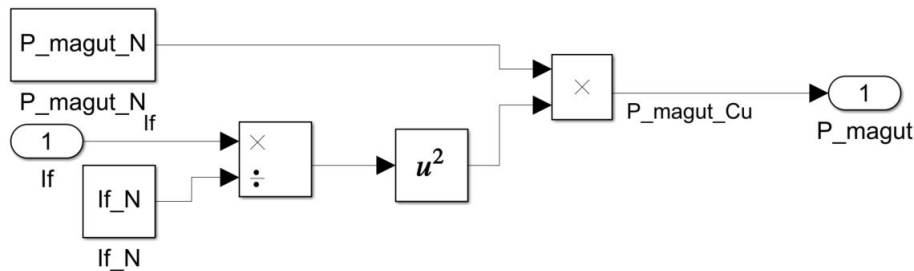
Dette tapet er en del av samtlige bremsemetoder. Men for "Kortsluttet statormetodikk" og "Fri spinn" vil tapet utgå ved avmagnetisering.

### 3.3 Tapene

#### Kobbertap Mag.Ut/ Mag.Ut.Cu

$$P_{Mag.ut} = P_{mag.ut.,N} \cdot \left(\frac{I_f}{I_{f,N}}\right)^2 \quad (34)$$

Hvor  $P_{Mag.ut.}$  er tap i magnetiseringsutstyr oppgitt i teknisk datablad.  $I_f$  er feltstrøm.  $I_{f,N}$ , Nominell feltstrøm gitt i teknisk datablad.



Figur 36: Blokkskjema for magnetiseringsutstyrstap i Simulink

Hovedtapet i magnetiseringsutstyret er kobbertap i MT, derfor neglisjeres tap i likeretter samt tap i slepinger. Dette fører til at tapene kan regnes som rent ohmske og kan beregnes ved ohms lov:  $P = RI^2$ , hvor i dette tilfellet  $I$  er feltstrømmen i rotor  $I_f$ :

$$P_{Cu,Trafo} = R \cdot I_f^2 \quad (35)$$

Dermed kan man beregne tapet ved:

$$\frac{P_{Cu,Trafo} = R \cdot I_f^2}{P_{Cu,Trafo,N} = R \cdot I_{f,N}^2} \rightarrow P_{Cu,Trafo} = P_{Cu,Trafo,N} \cdot \left(\frac{I_f}{I_{f,N}}\right)^2 \quad (36)$$

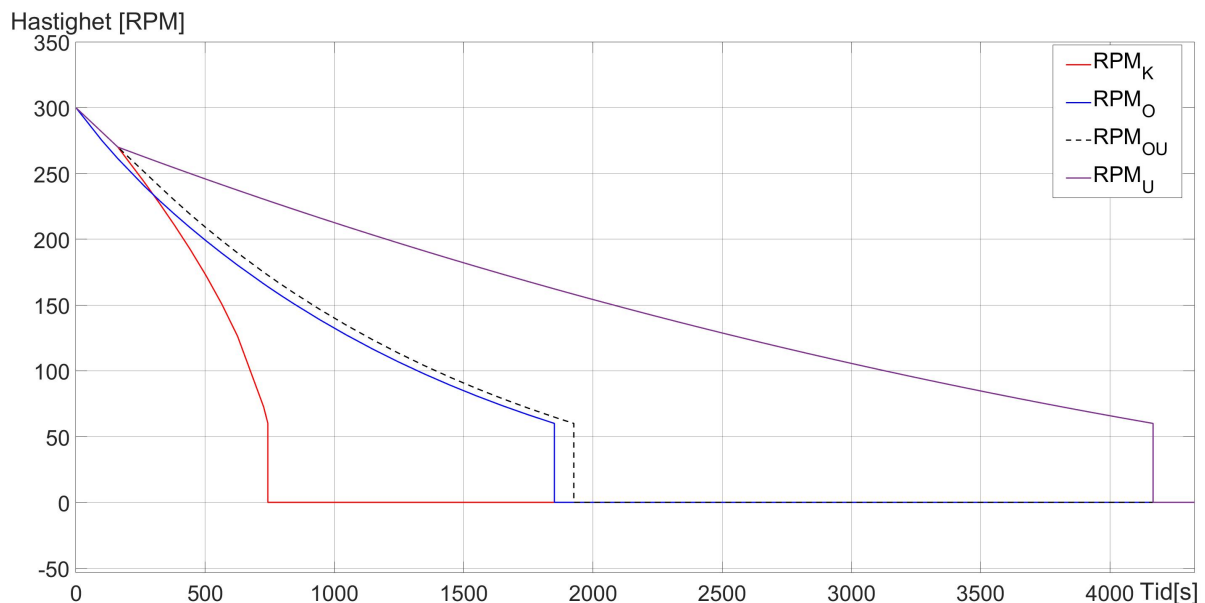
Her vil tapet være tilstede når generatoren mates med magnetiseringsstrøm og vil i "Kortsluttet statormetodikk" og "Fri spinn" utgå ved avmagnetisering.

## 4 Resultater

Det er laget en modell som forsøker å generalisere tap under nedbremsing slik at modellen kan kjøres på anlegg med forskjellige størrelser. Resultater fra de anlegg gruppen har hatt tilgang til blir presentert under. Med både Fri spinn, Kortslettet statormetodikk og Åpen statormetodikk representert.

### 4.1 Større Pelton aggregat

I Figur 37 vises bremseforløpene til hver stoppmetode representert som turtall mot tid. Her kommer det tydelig frem forskjellen på effekten med og uten magnetiseringskurve og den umiddelbare effekten av å utnytte tomgangskarakteristikken til å øke feltstrømmen i starten av forløpet. I tabell 1 vises stopptider i minutter og forbedringen i prosent fra fri spinn. Gruppen ønsker å trekke frem at effekten av å ikke benytte tomgangskarakteristikken er liten.



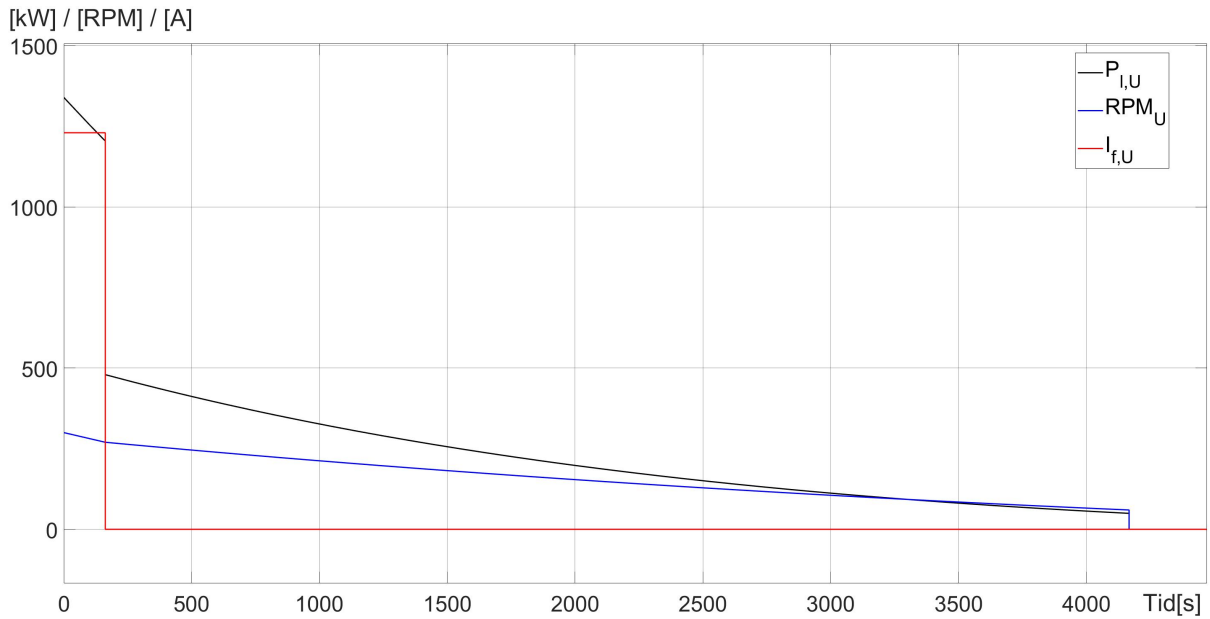
Bremsemetode	Stopptid [min]	Forbedring fra fri spinn[%]
Fri spinn	69.4	-
Åpen statormetodikk u.MagKurv	32.1	53.77
Åpen statormetodikk m.MagKurv	30.9	55.58
Kortslettet statormetodikk	12.4	82.18

Tabell 1: Større pelton. Stopptider og forbedring alle stoppmetoder

## 4.1 Større Pelton aggregat

### 4.1.1 Fri spinn

Ved Fritt spinn vil generatoren være magnetisert fram til 90% av  $f_N$ . Dermed forårsaker magnetiseringen et ekstra tap fram til generator avmagnetiseres etter 162 sekunder. I tabell 2 kommer det fram at lager står for 59.9% av bremseenergien, mens viftetapene står for 25%.



Figur 38: Større pelton. Fri spinn. RPM, P<sub>i</sub>, I<sub>f</sub>

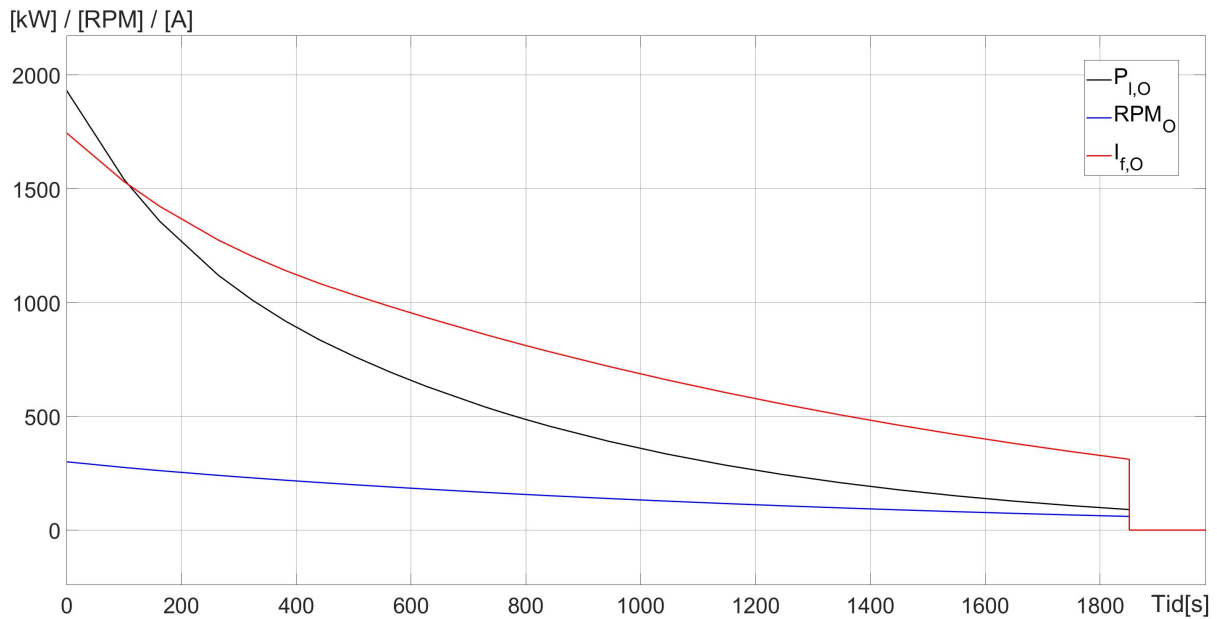
Tapsbeskrivelse	Andel av total bremseenergi [%]
Lager	59.9
Vifte	25.0
Jern	5.4
Magnetisering	5.5
Magnetiseringsutstyr	0.2
Mekanisk brems	4.0

Tabell 2: Større pelton. Fri spinn. Tapsandel

## 4.1 Større Pelton aggregat

### 4.1.2 Åpen statormetodikk

Ved denne metodikken vil generatoren holde tomgangsfeltstrømmen til overmagnetiseringsgrensen inntreffer, deretter følge tomgangskarakteristikken til bremseforløpet er utført. I tabell 3 er magnetiseringstapet 33.2%, jerntapet 25.2%, mens lager og vifte samlet utgjør 36.7%.



Figur 39: Større pelton. Åpen statormetodikk. RPM, P<sub>I</sub>, I<sub>r</sub>

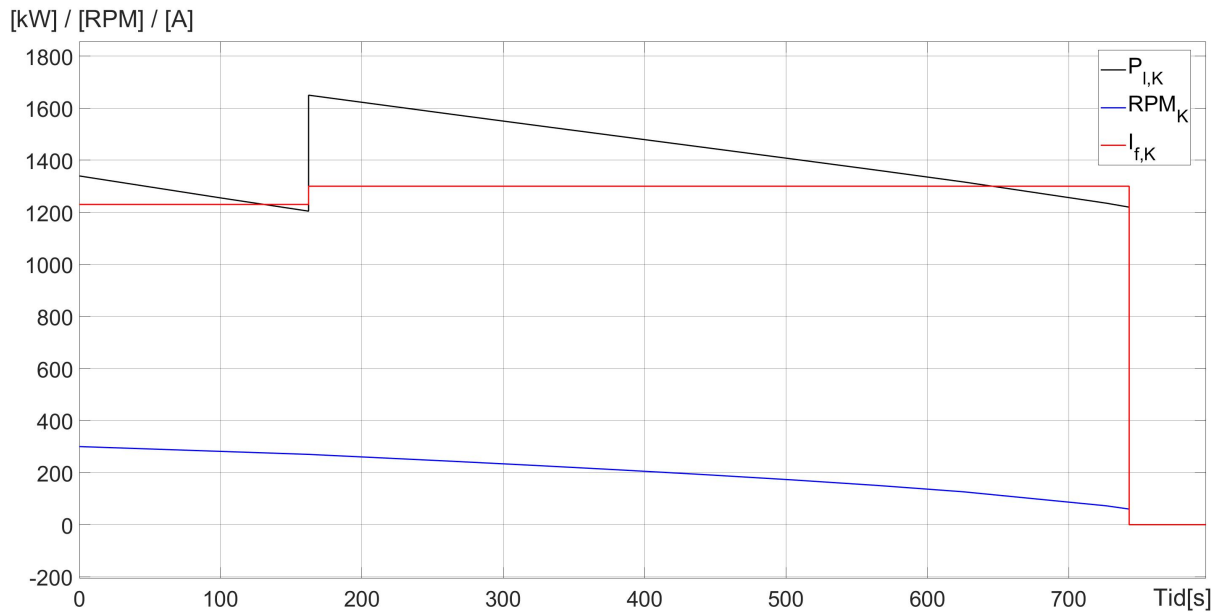
Tapsbeskrivelse	Andel av total bremseenergi [%]
Lager	25.9
Vifte	10.8
Jern	25.2
Magnetisering	33.2
Magnetiseringsutstyr	1.2
Mekanisk brems	3.7

Tabell 3: Større pelton. Åpen statormetodikk. Tapsandel

## 4.1 Større Pelton aggregat

### 4.1.3 Kortslettet statormetodikk

Ved Kortslettet statormetodikk vil generatoren være magnetisert fram til 90% av  $f_N$ . Dermed forårsaker magnetiseringen et ekstra tap fram til generator avmagnetiseres etter 162 sekunder. I tabell 4 vises det at kobbertapet i statorviklingene står for 62.6% av bremseenergien, mens lager og vifte samlet står for 22.3%.



Figur 40: Større pelton. Kortslettet statormetodikk. RPM, P<sub>I</sub>, I<sub>f</sub>

Tapsbeskrivelse	Andel av total bremseenergi [%]
Lager	14.9
Vifte	7.4
Jern	5.4
Magnetisering	5.5
Magnetiseringsutstyr	0.2
Statorvikling	62.6
Mekanisk brems	4.0

Tabell 4: Større pelton. Kortslettet statormetodikk. Tapsandel

## 4.2 Mindre Pelton aggregat



Figur 41: Mindre pelton. Bremseforløp

Bremsemetode	Stopptid [min]	Forbedring fra uten brems[%]
Normalt bremseforløp (uten brems)	40.4	-
Åpen statormetodikk u.MagKurv	34.7	14.12
Kortsluttet statormetodikk	9.2	77.29

Tabell 5: Mindre pelton. Stopptider og forbedring alle stoppmetoder

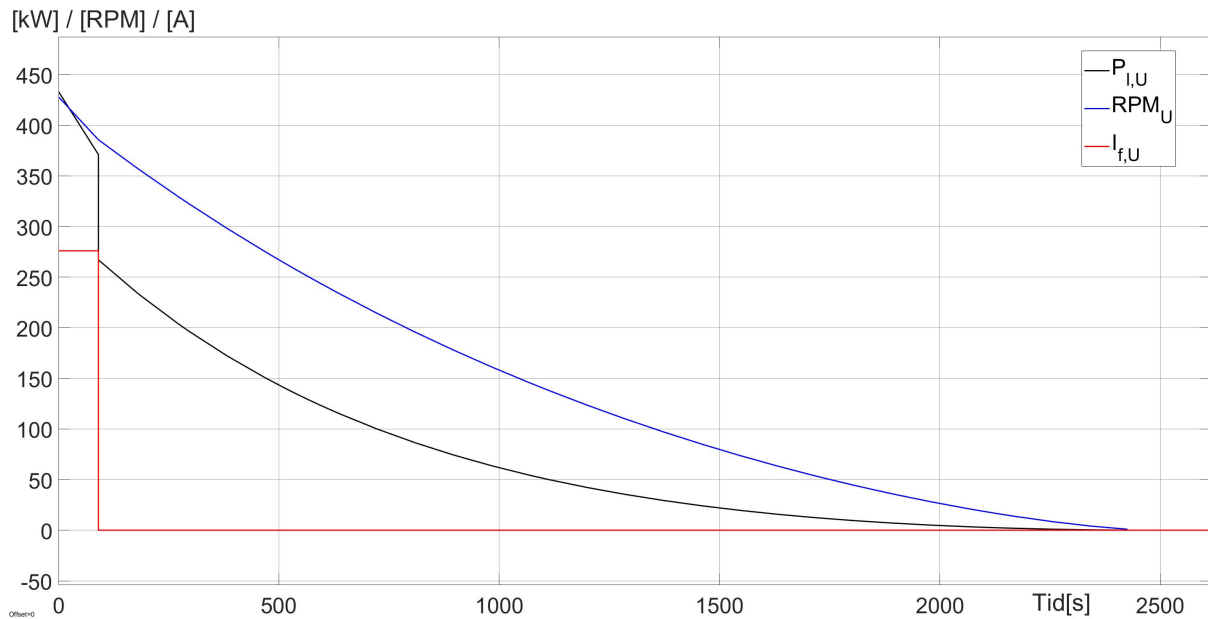
Tapsbeskrivelse	Nominelt tap [kW]
Jerntap	180
Vent og friksonstap	320
Mag.tap i tomgang	34
Kobbertap	142
Tillegstap	70
Tap i Mag.Ut	0
Lagertap	160

Tabell 6: Mindre pelton. Tapsbeskrivelse

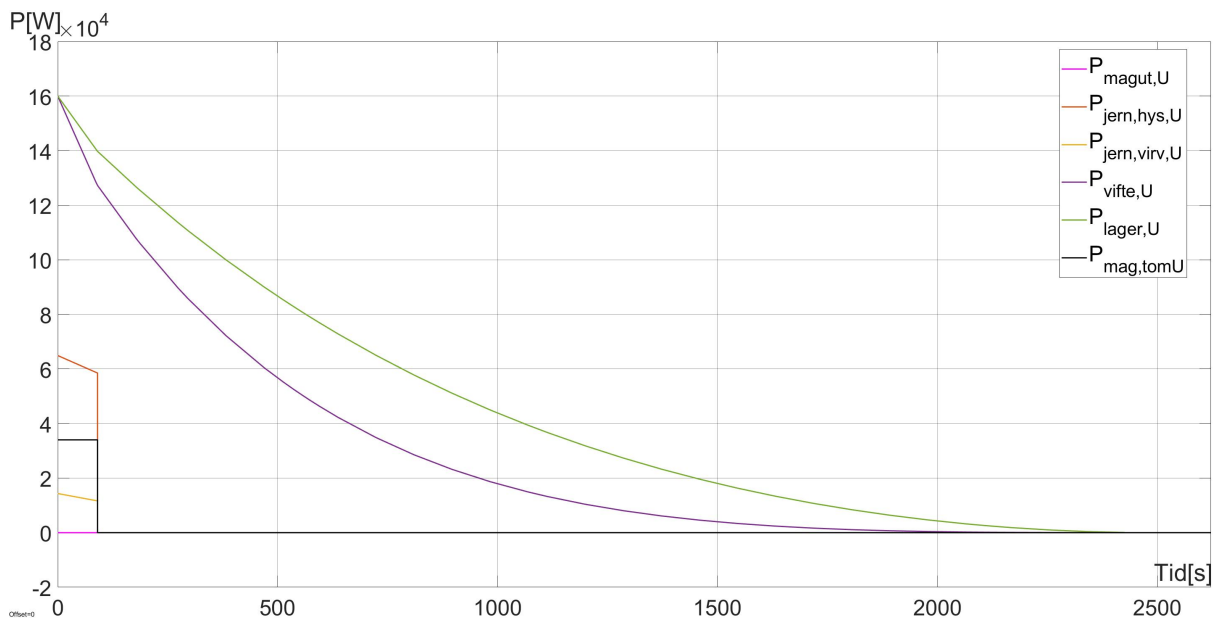
## 4.2 Mindre Pelton aggregat

### 4.2.1 Fri spinn

Ved Fritt spinn vil generatoren være magnetisert fram til 90% av  $f_N$ . Dermed forårsaker magnetiseringen et ekstra tap fram til generator avmagnetiseres etter 90 sekunder. I tabell 7 kommer det fram at lager står for 57.8% av bremseenergien, mens viftetapene står for 37.2%.



Figur 42: Mindre pelton. Fri spinn. RPM, PI, If



Figur 43: Mindre pelton. Fri spinn. Tapforløp



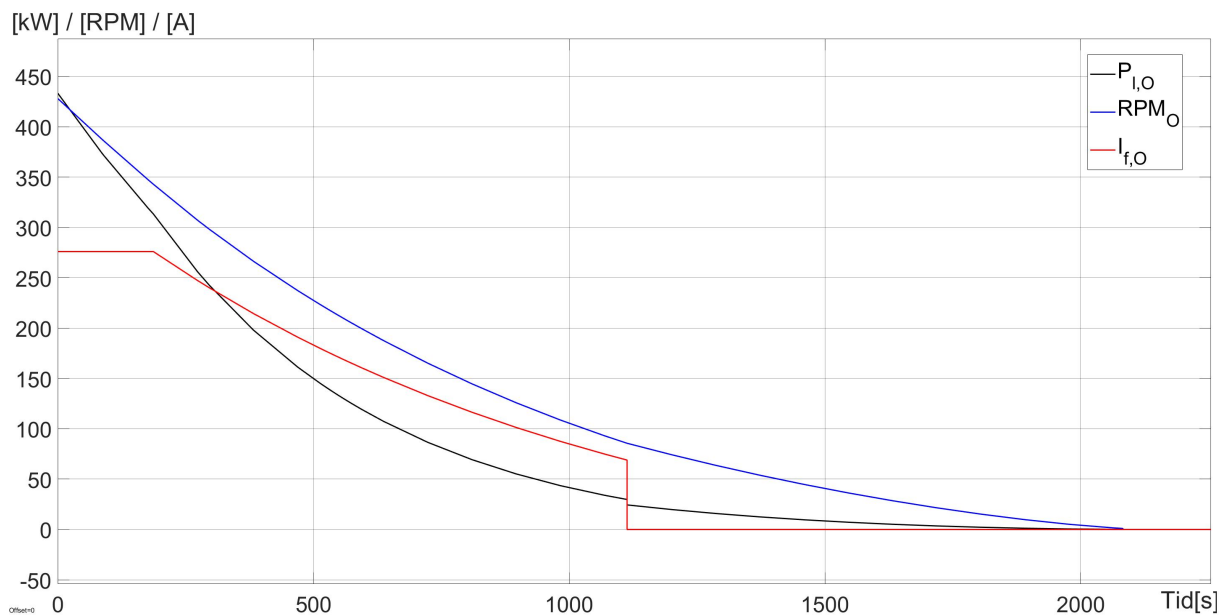
## 4.2 Mindre Pelton aggregat

Tapsbeskrivelse	Andel av total bremseenergi [%]
Lager	57.8
Vifte	37.2
Jern	3.5
Magnetisering	1.6
Magnetiseringsutstyr	0
Mekanisk brems	0

Tabell 7: Mindre pelton. Fri spinn. Tapsandel

### 4.2.2 Åpen statormetodikk

Ved denne metodikken vil generatoren holde tomgangsfeltstrømmen til overmagnetiseringsgrensen inntreffer, deretter følge tomgangskarakteristikken til bremseforløpet er utført. I tabell 8 er magnetiseringstapet 9.3%, jerntapet 16.8%, mens lager og vifte samlet utgjør 74.2%.

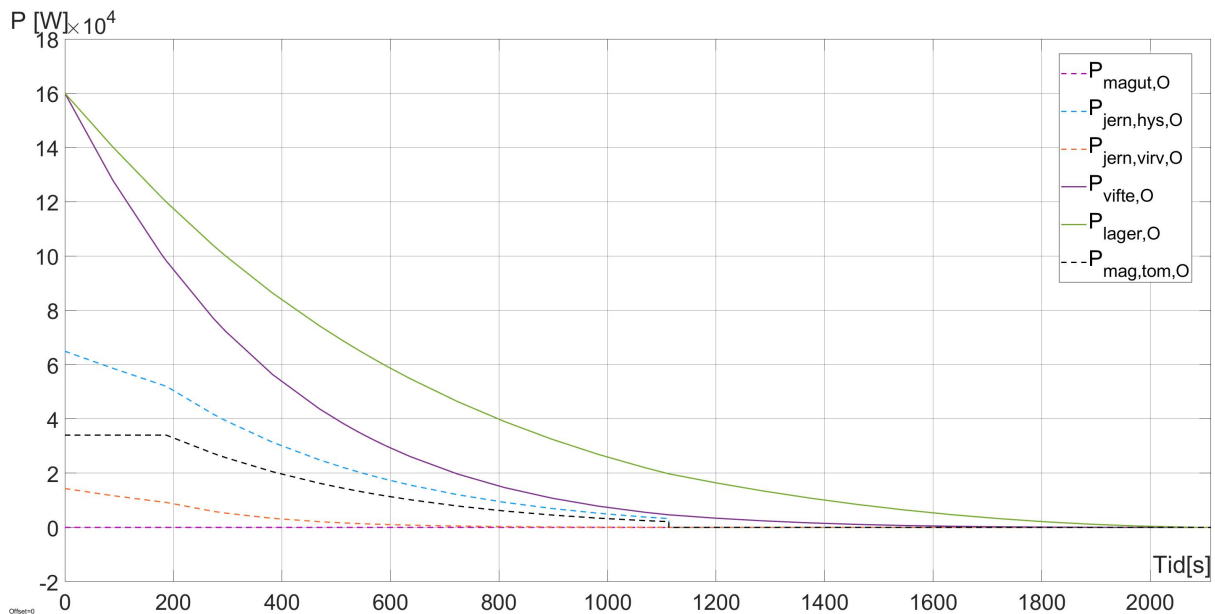


Figur 44: Mindre pelton. Åpen statormetodikk. RPM, PI, If

Tapsbeskrivelse	Andel av total bremseenergi [%]
Lager	45.2
Vifte	29.0
Jern	16.8
Magnetisering	9.3
Magnetiseringsutstyr	0
Mekanisk brems	0

Tabell 8: Mindre pelton. Åpen statormetodikk. Tapsandel

## 4.2 Mindre Pelton aggregat



Figur 45: Mindre pelton. Åpen statormetodikk. Tapforløp

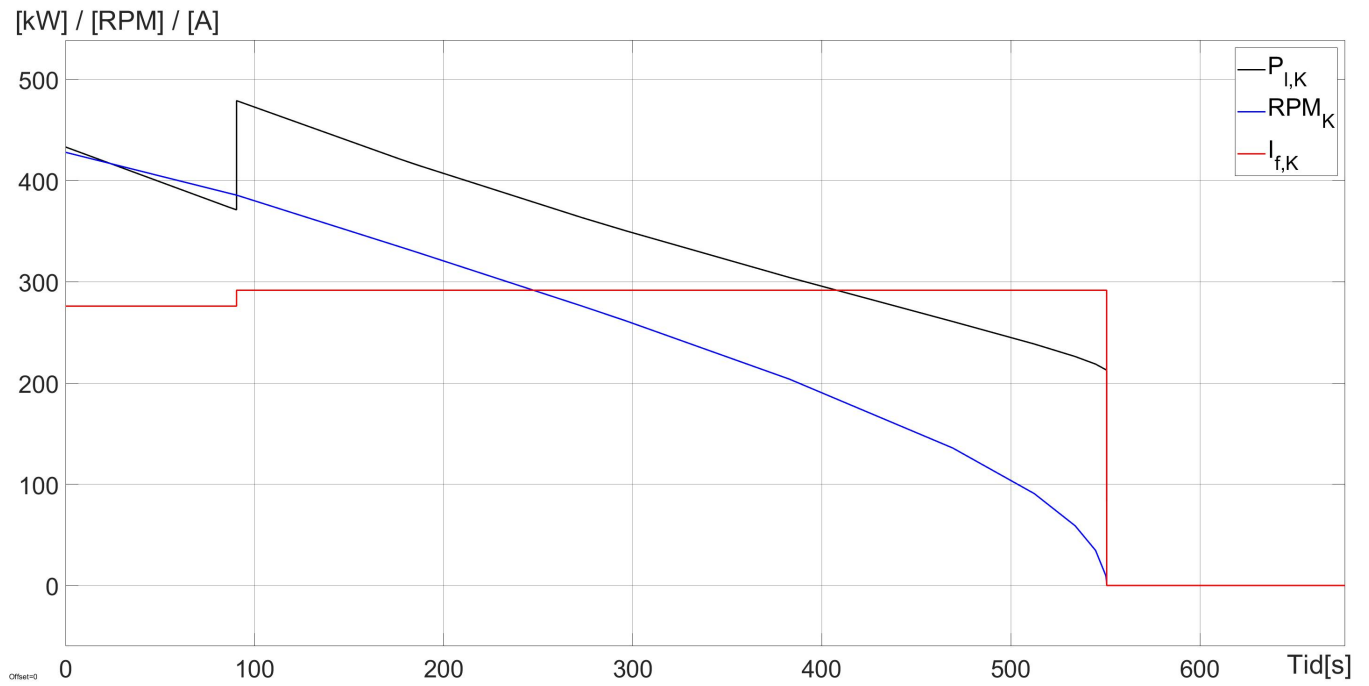
### 4.2.3 Kortslettet statormetodikk

Dette anlegget har ikke elektrisk brems. Kortslettet statormetodikk er en grov estimering av hvordan bremseforløpet ville ha sett ut om det hadde elektrisk brems. Basert på feltstrømsverdier i større pelton. Ved Kortslettet statormetodikk vil generatoren være magnetisert fram til 90% av  $f_N$ . Dermed forårsaker magnetiseringen et ekstra tap fram til generator avmagnetiseres etter 90 sekunder. Deretter økes feltstrømmen til oppgitt kortslutningsstøm. I tabell 9 vises det at kobbertapet i statorviklingene står for 50.5% av bremseenergien, mens lager og vifte samlet står for 44.5%.

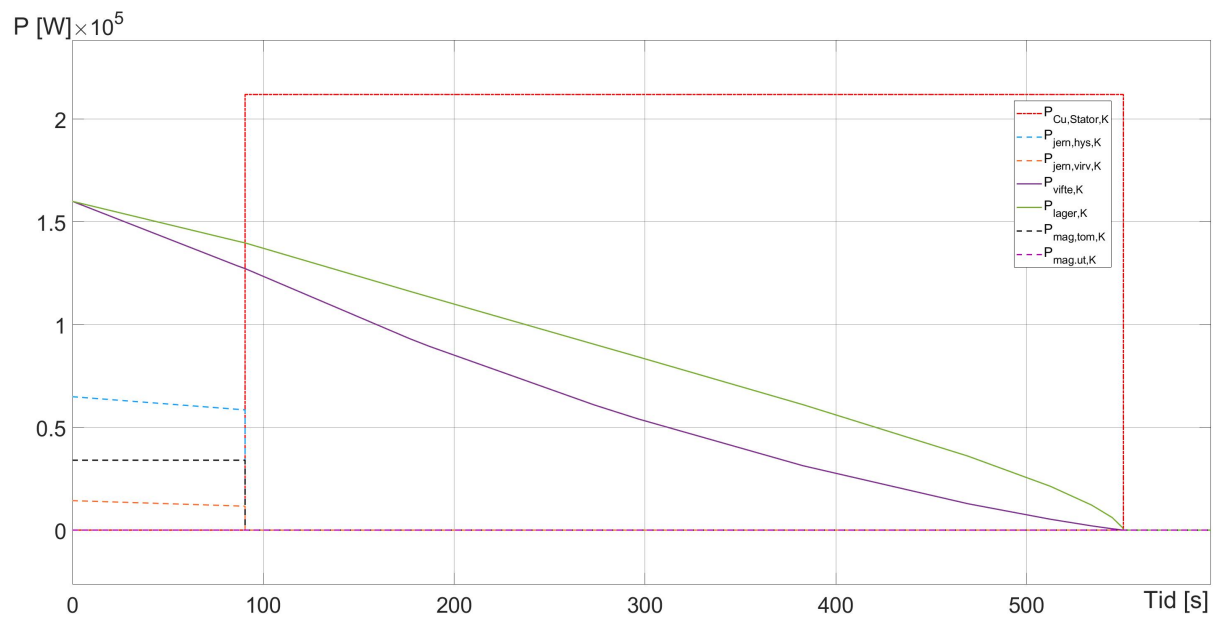
Tapsbeskrivelse	Andel av total bremseenergi [%]
Lager	25.2
Vifte	19.3
Jern	3.5
Magnetisering	1.6
Magnetiseringsutstyr	0
Statorvikling	50.5
Mekanisk brems	0

Tabell 9: Mindre pelton. Kortslettet statormetodikk. Tapsandel

4.2 Mindre Pelton aggregat



Figur 46: Mindre pelton. Kortsluttet statormetodikk. RPM, PI, If



Figur 47: Mindre pelton. Kortsluttet statormetodikk. Tapforløp

## 5 Diskusjon

Prosjektgruppen ønsker å understreke at målet ved oppgaven var å svare på om det finnes en gevinst ved åpen statormetodikk og videre tilrettelegge for fremtidig utvikling. Det er viktig at leseren forstår at et bachelorprosjekts korte tidshorison har begrensninger på hvor dypt gruppen kan gå i forståelsen av alle komponentenes påvirkninger. I løpet av prosjektets gang har flere variabler dukket opp, som gruppen ikke hadde forutsetning for å ha kjennskap til på forhånd. Disse har til tider vært for detaljerte eller dukket opp for sent til at prosjektgruppen har kunnet ta dem i betraktning.

Spesielt ønsker gruppen å trekke frem frekvensens påvirkning av MT, begrensninger fra likeretterens styringskort og mangelen på fullstendig data fra forskjellige anlegg som de største usikkerhetene ved resultatene. Hvor lenge magnetiseringen kan stå på under åpen statormetodikk er helt avhengig av at MT tåler frekvensjusteringen og at styringskortet tillater likeretteren å operere under lave spenninger. Modellen er basert på få anlegg og det kan dermed dukke opp problemer, variabler og annet som ikke var til stede ved de få anleggene den er basert på. Dette kan påvirke modellens virkemåte og nøyaktighet. Det er derfor viktig at resultatene fra modellen sees på som nettopp det, teoretiske resultater fra en modell som prøver å etterligne aggregatets bremseforløp.

Resultatene viser henholdsvis 55% (stor pelton) og 14% (liten pelton) reduksjon i stopptid ved bruk av åpen statormetodikk sammenliknet med fri spinn på de anlegg som ble testet. Dette skyldes at de mekaniske tapene representerer en mye større andel av det totale tapet ved det mindre anlegget enn ved det store. Dette gjør da at magnetiseringstapene og jerntapet betyr mindre når de bidrar med å redusere rotasjonsmomentet ved det mindre anlegget sammenliknet med det større. Det kan da konkluderes med at bremseeffekten er direkte koblet til andelen av det totale tapet jern- og magnetiseringstapet står for. Tapene ved åpen statormetodikk forsvinner med synkende turtall raskere enn de mekaniske tapene. Det vil dermed være størst effekt av åpen statormetodikk frem til midt i bremseforløpet hvor de mekaniske tapene har tatt over mye av bremseandelen.

Åpen statormetodikk møter på mange av sine utfordringer ved de laveste turtallene. Store synkrongeneratorer er dimensjonert for å opprettholde en fast frekvens, og det er et begrenset utenforliggende bruksområde. Her er trolig grunnen til begrenset forskning. Dette gjør at gruppen må anta at det ikke er en effekt som må bli tatt hensyn til. Jern- og magnetiseringstapet har ved lave frekvenser lav bremseeffekt. Gruppen ser samtidig at styringskortet trolig ikke tillater drift ved lave frekvenser, og dermed må kutte feltstrømmen. Dermed anses det som nødvendig med en annen bremseeffekt som minsker usikkerheten ved de lave frekvensene. Dette kan løses med feks. mekanisk brems.

Gruppen har i utgangspunktet forsøkt å inkludere francisanlegg i modellen. Problemet har vært mangel på tapsberegning av såkalt "Splashing". Dette fenomenet er diskutert med veiledere og gruppen ble henvist til kunnskapsrike fagfolk. Gruppen misslykkes i å komme i kontakt med rette fagpersoner. Dermed har gruppen besluttet å utelukke francisanlegg på bakgrunn av denne usikkerheten. Gruppen har sett på store anlegg der stopptiden allerede var kort, som trolig tilsier at denne generatortypen ikke har store problemer med å oppfylle NVF-kravene. I visse tilfeller kan åpen statormetodikk trolig hjelpe stopptidene til riktig side av kravene.

Mot slutten av prosjektperioden har gruppen fått en dypere forståelse for overmagnetiseringsbegrensning til generatorer og MTer. Dermed har gruppen innsett at bruken av  $115\% \phi$  kan være for høy på stopptider over 15 minutter. Forståelsen har samtidig åpnet en mulighet for å kunne kjøre generatorene helt på grensen av sine E/f kurver. Skal dette videre undersøkes må det dynamiske forløpet til feltstrømmen tas til betraktning.

For å forenkle modellen har gruppen i samarbeid med veileder besluttet å basere tapsberegningene fra det tidspunktet hvor generatoren har koblet seg fra stivt nett og eventuell opprusig har forekommet. Da vil generator starte bremseforløpet fra tomgang. Dermed kan man benytte tomgangstap som initierende tap og videre skalere tapene ned enkle empiriske formler. Samlingen av tapene i magnetiseringsutstyret til et kobbertap er gjort for å unngå unødvendig komplikasjoner. Gruppen anser dette tapet som lite og utgjør liten endring i nøyaktigheten til modellen. Grunnen til at friksjonstapene avviker noe fra empirisk formel er at gruppen har erfart at denne tapsfaktoren har mange komponenter som er krevende å uttrykke teoretisk. Som dermed kan anses som en faktor som må tilpasses hvert anlegg.

Det vil være hensiktsmessig å videre undersøke frekvens påvirkningen av MT og tilpasse modellen til å ta hensyn til påvirkningen spesielt mtp. forholdet mellom primær- og sekundærspenningen. Styringskortets begrensning er allerede implementert i modellen, men dets funksjon er ikke undersøkt av gruppen. Det er antatt i modellen at den kun bryr seg om spenninger og ikke frekvens. Effekten av en ujevn feltspenning på rotorfeltet og dets påvirkning på stator burde undersøkes. Før en praktisk test må logikken i stoppsekvensen tilpasses bremseforløpet.

Gruppen har fundert på alternative ordninger som kan benytte en kombinasjon av åpen statormetodikk og kortsluttet statormetodikk. Det kan kobles et batteri på etter likeretter som kan øke lasten, samt at energien kan brukes til andre formål på anlegget eller som feltstrømkilde mot slutten av bremseforløpet. Det kan kobles en effektmotstand på statorutgang. Dette kan gjøres ved å tilføre en ekstra effektbryter som kobles inn under bremseforløp, da tilføres kobbertapet i stator som en ekstra bremseeffekt.

## 6 Konklusjon

Prosjektgruppen har fremstilt en brukervennlig modell basert på en kombinasjon av Matlab, Simulink og Excel som kan beregne stopptid for vannkraftverk med peltonturbiner. Modellen legger godt til rette for videre utvikling og den viser at det ligger en gevinst i å bruke eksisterende magnetiseringssystem til å redusere stopptiden på et aggregat (åpen statormetodikk). Dette gir muligheten til å oppfylle de veiledende kravene gitt i NVF og imøtekomme driftsendringer i kraftproduksjonsmarkedet. Med dette, sees oppgavens mål nådd. I forhold til videre forskningsarbeid vil vi anbefale å grundigere undersøke effekten en synkende frekvens har på MT og de implikasjonene resultatet har for modellens virkemåte. Effekten av ujevn feltspenning ved lave frekvenser må også undersøkes, samt å tilpasse og teste modellen mot flere anlegg. Modellen er basert på få anlegg og kan derfor inneholde uforutsette feil. Resultatene er ikke teset i et praktisk forsøk, verken laboratorieforsøk eller skarp test, og kan med det ha varierende nøyaktighet.

Resultatene viser at et større pelton anlegg kan gå fra 70 minutter med fri spinn til **31 minutter** ved å ta i bruk åpen statormetodikk. Dette tilsvarer en reduksjon i stopptid på 55%. Kortsluttet statormetodikk for samme anlegg gir en stopptid på 12 minutter og en reduksjon i stopptid på 82%. Et mindre pelton anlegg kan gå fra 40 minutters stopptid med fri spinn til **34 minutter** med åpen statormetodikk. En 14% reduksjon. På dette anlegget er det estimert en stopptid på 9 minutter som tilsvarer en reduksjon på 77% ved bruk av kortsluttet statormetodikk.

I anlegg med høy andel jern- og magnetiseringstap er forbedringspotensialet størst, derimot har anlegg med mindre andel en mindre fortjeneste. Åpen statormetodikk kan være løsningen til anlegg som trenger en liten endring for å komme innunder kravene. På anlegg hvor installasjon av mekanisk brems alene ikke er nok kan åpen statormetodikk tilføre nok bremseeffekt, slik at kortsluttet statormetodikk ikke blir nødvendig. Ut fra prosjektgruppens undersøkelser åpner forenklet elektrisk brems for interessante kombinasjoner og i enkelte tilfeller et alternativ til elektrisk brems.

## Referanser

- [1] Statkraft. Ulla-Førre. page 4.
- [2] Lyse AS. Lysebotn 2 Kraftverk. May 2022.
- [3] Linda Haugvaldstad. Lysebotn II kraftverk. page 11, September 2018.
- [4] Eidsiva. Utvidelse av Rendalen kraftverk. pages 27, 35, 2011.
- [5] WaterPower. Pumped storage: the future in Germany, May 2022.
- [6] Andritz. Automation solutions for hydropower plants.
- [7] Voith. Voith\_kurskompendium. Technical report, September 2010.
- [8] D. P Kothari and I. J Nagrath. Electric machines. In *Electric machines*, pages 38–40, 65, 282–285, 494, 505–506, 530. McGraw Hill India, India, 2018. OCLC: 1223329383.
- [9] Pengky. Three Phase Alternator Model, Hentet 2022.
- [10] Stephen J. Chapman. The internal generated voltage of a synchronous generator. In *Electric machinery fundamentals*, pages 192,193,199. McGraw-Hill, New York, 5th ed edition, 2012. OCLC: ocn695032905.
- [11] Theodore Wildi. In *Electrical machines, drives and power systems*, Pearson New International Edition, pages 31, 355–356, 358, 363, 374–375. Pearson Education Limited, Harlow, 6., ed., pearson new international edition edition, 2014. ISBN: 978-1-292-02458-5.
- [12] Stephen J. Chapman. Figure 4-7. In *Electric machinery fundamentals*, page 198. McGraw-Hill, New York, 5th ed edition, 2012. OCLC: ocn695032905.
- [13] Veileder i kvalitetssikring av små vannturbiner. February 2007.
- [14] Rolf Gustavsson. Radial dampers impact on shaft vibration at resonance. March.
- [15] Fred Wiesinger. Lift System Letting You Down? Troubleshooting Problems. July 2014.
- [16] Quiri. Braking and lifting cylinders. 2022.
- [17] 2021 Statnett. NVF 2021 - Nasjonal veileder for funksjonskrav i kraftsystemet. page 119, July 2021.
- [18] Hydropower.org. Seven ways to make a hydropower station a safer workplace. September 2015.
- [19] Ali Abdi Abdi. Start and stop costs for secondary regulation of fortum hydropower plants. Technical report, Sverige, December 2016.

- [20] inc Rexa. Turbine inlet valve bypass. Technical report, January 2018.
- [21] Maalen Steinar. Vannkraftverk, elektro Teknikk, hensyn, muligheter. Technical report, Stavanger, June 2016.
- [22] Norsk elektroteknisk komite. *NEK EN 60204-1*. Opplag 2 (2018-10-18). Norsk Elektroteknisk Komite, Norge, opplag 2 (2018-10-18) edition, October 2018.
- [23] Jan Machowski, Zbigniew Lubosny, Janusz W. Bialek, and J. R. Bumby. 2.3.1 Synchronous Generators. In *Power system dynamics: stability and control*, pages 19, 20. John Wiley, Hoboken, NJ, USA, third edition edition, 2020.
- [24] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins. *Power electronics: converters, applications, and design*, pages 140 ,607–608. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 3rd ed edition, 2003.
- [25] Waquar. Francis Turbines. May 2022.
- [26] renewablesfirst.co.uk. Pelton Turbines. May 2022.
- [27] Tobias Forseth Stokland. *EM-modellering og analyse av magnetfeltet i endeområdet til store synkrongeneratorer*. Masteroppgave, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, NTNU, Trondheim, June 2016.
- [28] IEEE guide for abnormal frequency protection for power generating plants. *IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987)*, pages 1–40, 2004.
- [29] mathworks.com. MATLAB, 05.20.22.
- [30] mathworks.com. Choose a Solver, 05.20.22.
- [31] Fosweb: Data for produksjonsanlegg – vann- og varmekraftaggregater – parameterveileder (2017-09), 2017.
- [32] Mircea Fratila, Abdelkader Benabou, Abdelmounaim Tounzi, and Maxime Dessoude. Iron Loss Calculation in a Synchronous Generator Using Finite Element Analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(2):640–648, June 2017.



# Vedlegg

## FORENKLET ELEKTRISK BREMS FOR VANNKRAFTVERK VED ÅPEN STATORMETODIKK

**Henrik Smestad Aamodt**    **Sondre Eide Borchgrevink**    **Hallvard Hustoft**  
 Institutt for elkraftteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

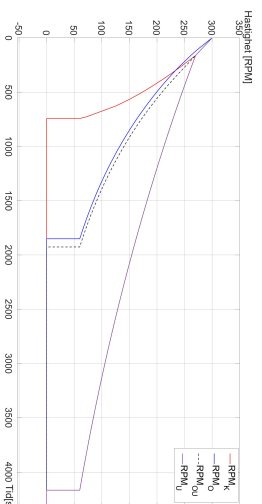
**NTNU**  
 Norwegian University of  
 Science and Technology

### Bakgrunn og formål

Statkraft ønsker å finne ut av om det er noen gevinst ved bruk av forenklet elektrisk brems mot eksisterende elektrisk bremsløsning for å stoppe vannkraftverk eller lastavslag og eventuelt i hvilken grad løsningen kan bremse anlegg. En forenklet brems metode kan:

- Innelukomme Statkrafts veiledende funksjonskrav for kraftsystemet
- Bidra til mer fleksibel drift samt skape mulighet for en økning i kraftproduksjon
- Være en tid- og kostnadsbesparende løsning, i forhold til nåværende alternativer som løses via installasjon av elektrisk brems

### Resultater



Figur 2 Bremseløpene Store Porsen Anlegg

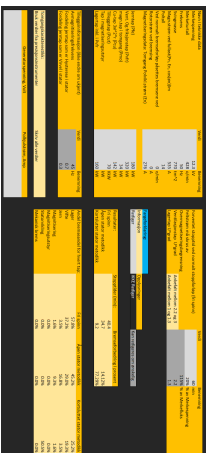
### Metode

Arbeidet omfatter utforming av en brukervennlig simuleringmodell til testing og analyse av ulike vannkraftanlegg.

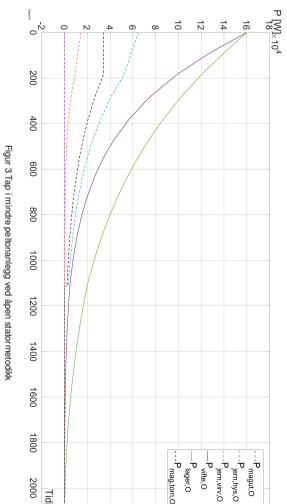
- De ulike stoppløpene:
- Fri spinn
  - Korsluta statormetodikk
  - Åpen statormetodikk

### Simuleringmodell

I simuleringmodellen benyttes Matlab, Simulink og Excel



Figur 1 Excel



Figur 3 Tids innrede på bremseløpene ved åpen statormetodikk

Bremsemetode	Stopp tid [min]		Forbedring fra fri spinn [%]
	(Stor / Liten)	(Stor / Liten)	
Fri spinn	69.4 / 40.4	-	-
Åpen statormetodikk u/MagKurv	32.1 / 34.7	53.77 / 14.12	
Åpen statormetodikk m MagKurv	30.9 / -	55.58 / -	
Korsluta statormetodikk	12.4 / 9.2*	82.18 / 77.29*	

\*Estimert

### Diskusjon

Spesielten ønsker gruppen å trekke frem trekkværens påvirkning av magnetiseringsstatoran (MT), begrensninger fra likeretterens styringskort og mangelen på fullstendig data fra forskjellige anlegg som de største usikkerhetene ved resultatene. Hvor lenge magnetiseringen kan stå på under åpen statormetodikk er helt avhengig av at MT blir frekvensjusteringen og at styringskortet tillater likeretteren å operere under lave spenninger. Tapene ved åpen statormetodikk forsvinner med synkende turall raskere enn de mekaniske tapene. Det vil dermed være stort effekt av åpen statormetodikk frem til midt i bremseløpet hvor de mekaniske tapene har tatt over mye av bremsarbeidet. Åpen statormetodikk meder på mange av sine utfordringer ved de laveste turallene.

### Konklusjon

Det er fremstilt en brukervennlig modell basert på Matlab, Simulink og Excel som kan beregne stopptid for vannkraftverk med peltonutdriner. Modellen legger til rette for videre utvikling og viser en gevinst i å bruke eksisterende magnetiseringsystem til å redusere stopptiden på et aggregat (åpen stator-metodikk). Dette gir muligheten til å oppfylle NVF-kravene og innelukomme driftsdrifter i kraftproduksjonsmarkedet. Videre arbeid fra oppgaven er å undersøke:

- Effekten en synkende frekvens har på MT og de implikasjonene resultatet har for modellens virkemåte.
- Effekten ved ulvorne teltspenning i de lavfrekvente områdene.
- Tilpasse og teste modellen mot flere anlegg.

I anlegg med høy andel jern- og magnetiseringsanlegg er forbedringspotensialet størst. Åpen stator-metodikk kan være løsningen til anlegg som trenger en liten endring for å komme innunder kravene. På anlegg hvor installasjon av mekanisk brems allerede ikke er nok kan åpen-statormetodikk tilføre nok bremseseffekt, slik at korsluta stator-metodikk ikke blir nødvendig. Forenklet elektrisk brems åpner dermed for interessante kombinasjoner og et alternativ til elektrisk brems.

### Referanse

[1] Henrik Smestad Aamodt, Sondre Eide Borchgrevink, and Hallvard Hustoft. Forenklet Elektrisk Brems for Vannkraftverk ved Åpen statormetodikk, 2022.

Navn i tekniske data	Verdi	Bemanning
Merkespenning	12.3 kV	
Merkeurtall	428 o/min	
Frekvens	50 Hz	
Svingnasse	770 tm <sup>2</sup>	
Magn.strøm ved fulllast(Pn, En, cos(φn))Im	535 A	
Poltaill	14	
Ved normalt bremseforløp påsettes bremsene ved Rotorstrøm ved bremsing	0 o/min	
Magnetiseringsdata: Tomgang Polvikl.strøm (En)	0 A	
	276 A	
Jerntap (Pfe)	180 kW	
Vent. Og friksjonstap (Pvfr)	320 kW	
magn.tap i tomgang (Pmo)	34 kW	
Cu-tap 3xI <sup>2</sup> *r (Pcu)	142 kW	
Tilleggstap (Pcut)	70 kW	
Tap i magnetiseringsstyr	160 kW	
Lagertap inkl. i Pvfr		

Tilleggsinformasjon (ikke endre om ukjent)	Verdi	Bemanning
Avmagnetiseringsfrekvens	45 Hz	
Fordeling jerntap som er Hysterese i stator	0.7	
Fordeling jerntap som er Virvel i stator	0.3	

Tomgangskarakteristikk:	Verdi	Bemanning
Bruk verdier fra presisjonsinstrumenter	Skriv alle verdier	

Generatorspenning, Volt	Polhjulstrøm, Amp

Forventet stopptid ved normalt stopporløp (fri spinn)	Verdi	Bemanning
Feltsstrøm må sikrus av	60 min	
Overmagnetiseringsbegrensning	20% % av Merkespenning	
Ventilasjonstap U <sup>2</sup> /grad	1.15% % av Merkefluks	
Lagertap U <sup>2</sup> /grad	2.2	
	1.3	

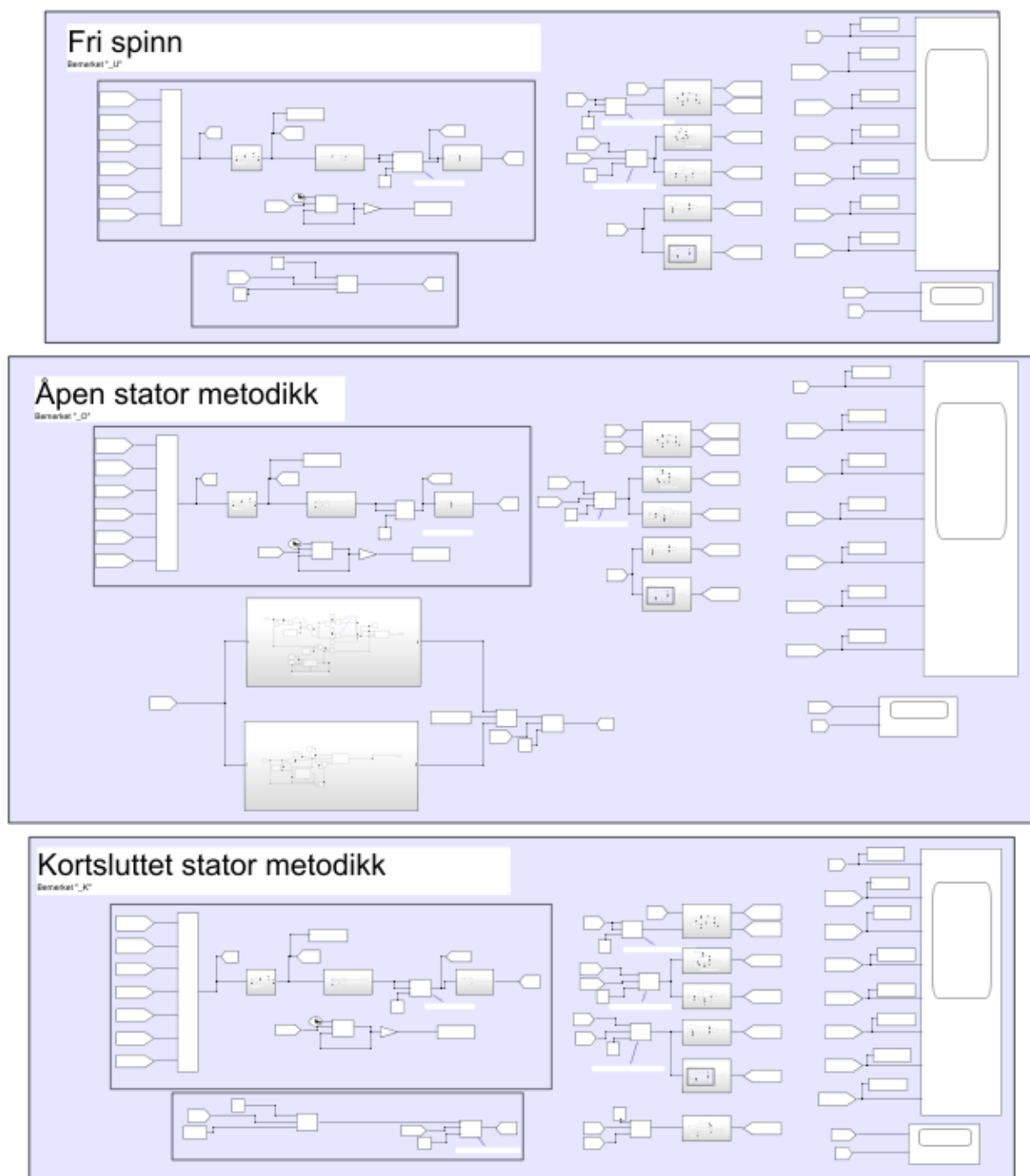
Fargeforklaring:	Opplysninger	kan redigeres om ønskelig
Informasjon	IKKE Rediger	

Resultater:	Stoptider (min):	Bremseforbedring i prosent
Fri spinn	40.4	
Åpen stator metodikk	34.7	14.12%
Kortsluttet stator metodikk	9.2	77.29%

Andel bremseandel for hvert tap:	Fri spinn	Åpen stator metodikk	Kortsluttet stator metodikk
Lager	57.8%	45.2%	25.2%
Vf/fe	37.2%	29.0%	19.3%
Jern	3.5%	16.8%	3.5%
Magnetisering	1.6%	9.3%	1.6%
Magnetiseringsstyr	0.0%	0.0%	0.0%
Statorvikling	0.0%	0.0%	50.5%
Mekanisk brems	0.0%	0.0%	0.0%



Figur 49: Oversiktsbilde Simulink fil

Blokk	Beskrivelse
	Genererer et konstant signal med en gitt verdi
	Legger sammen inndata signalene til en sum
	Gjør det samme som blokken over
	Trekker det nederste inndata signalet fra det øverste
	Multipliserer inndata signalene med hverandre
	Deler det øverste inndata signalet på det nederste
	Multipliserer inndata signalet med en gitt verdi
	Opphøyer inndata signalet med en faktor 2
	Opphøyer nederste inndata signal i øverste inndata signal
	Utfører en kontinuerlig integrering av inndata signalet
	Slipper igjennom øverste inndata så lenge kriteriet i blokken er oppnådd av midterste inndata. Om ikke slippes nederste inndata gjennom
	Skriver inndata til navngitt variabel i "base workspace" med gitt tidsintervall
	Sender inndata trådløst til blokken under med samme navn
	Mottar data fra blokken over med samme navn
	Kontinuerlig produserer stimuleringstiden
	Inn og ut signalblokk for undersystemer
	Kontinuerlig måler inndata verdien og viser det som en graf avhengig av tid

Tabell 10: Simulink blokker brukt i modellen

