

# Dynamisk analyse for nettintegrasjon av småkraft

**Vebjørn Vidarsson Haukaas**

Master of Science in Electric Power Engineering  
Innlevert: juni 2017  
Hovedveileder: Kjetil Uhlen, IEL

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for elkraftteknikk



*Denne rapporten er et resultat av TET4910 Elkraftteknikk, masteroppgave, våren 2017.*

*Jeg vil takke min hovedveileder, Kjetil Uhlen for gode diskusjoner og veiledning gjennom hele oppgaven.*

*En spesiell takk til veileder Bjørn Erik Strand i Siemens Power Technologies International (PTI) som har brukt mye tid på meg gjennom hele perioden. Dette både via på Communicator-samtaler og uke 12 hvor vi jobbet i lag ved Oslokontoret.*

*Ved Siemens PTI og Voss Energi vil jeg takke Haakon Engen, Olav Alstad, Irina Tikhomirova, Sindre Solberg og John Magne Herre for hjelp med datainnhenting, oppbygning av modell og opplæring i programvare. I tillegg til all tid og ressurser dere har brukt på meg gjennom sommerjobb og skoleår.*

*Til slutt vil jeg takke Trond Toftevaag ved Institutt for Elkraftteknikk og Øyvind Holm ved Voith Hydro for innhenting av typiske verdier brukt i småkraftverk.*

## SAMMENDRAG

Et distribusjonsnett med mye lokal småkraftproduksjon kan gi stabilitetsutfordringer i nettet. Under Evanger trafostasjon er det i dag seks småkraftverk i drift. I tillegg er det fem småkraftverk som venter konsesjonsbehandling av NVE.

I denne rapporten utføres det en dynamisk nettanalyse av nettet til netteier Voss Energi i område rundt Evanger. Dette innebærer kartlegging av transient og stasjonær stabilitet på eksisterende generatorer, samt sette krav for reaktanser og svingmasse på nye generatorer.

Nettanalysen viser at fire av eksisterende generatorer ikke transient stabile for feil med 20 % restspenning og varighet 200 ms i Evanger Transformatorstasjon. Tiltak som er diskutert på ustabile generatorer er øking av svingmasse og reduksjon av reaktiv effekt trukket fra nettet. Ved å studere egenverdiene til systemet, er alle generatorene å anse som stasjonær stabile. Krav til reaktanser og svingmasse på nye generatorer er riktig dimensjonert ut fra forutsetninger som settes til transient stabile generatorer.

Oppgaven vil ha høy fokus på utførelsen av slike nettanalyser. Det er blitt gjennomført en datainnsamling av 62 generatorer. 20 av disse ble brukt i et tobussystem for å undersøke hvor lenge de holder seg i synkronisme ved forskjellige spenningsdip. Videre ble påvirkningskraften til ulike parametre undersøkt på tre av disse generatorene. Dette for å kartlegge hvordan usikkerheter i slike parametre vil påvirke dynamiske nettanalyser, og hvilke forutsetninger som kan oppnå en konservativ nettanalyse. Slik kan man sikre at analysen ikke fører til feildimensjonering. Valg og diskusjoner i den dynamiske nettanalysen til Voss Energi, baseres på konklusjoner fra dette.

## ABSTRACT

A distribution system with a large amount of small hydro power production can cause stability issues. As of now there are six small hydro power plants connected to the 22 kV grid under Evanger Transformer Station. In addition, five more are waiting for licenses by NVE.

In this thesis a dynamic analysis of the mentioned distribution system will take place. This includes transient and stationary studies of the existing generators and propose requirements for reactances and inertia on the new generators.

The results show that four of the existing generators are not transient stable during a fault event in Evanger Transformatorstasjon, with 20 % voltage dip and duration of 200 ms. There are considered some measures for the unstable generators; increase in inertia and reducing the absorption of reactive power. By studying the eigenvalues of the system, all generators are found to be stationary stable. The requirements for reactances and inertia for the new generators are correctly dimensioned according to prerequisites made for transient stable generators.

The report will have high focus on the execution of dynamic analysis in general. There has been conducted a data collection of 62 generators. 20 of these were used in a two bus system to investigate how long they stay within synchronism at different voltage drops. Furthermore, the influence of various parameters was investigated on three of these generators. This is to identify how uncertainties in such parameters will affect dynamics analysis, and what prerequisites can achieve conservative analysis. This ensures that the analysis does not lead to incorrect sizing of generators. Choices and discussion in the Voss Energi analysis are based on conclusions from this.



# INNHALDSFORTEGNELSE

<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>INNHALDSFORTEGNELSE</b> .....	<b>V</b>
<b>TABELLER</b> .....	<b>VIII</b>
<b>FIGURER</b> .....	<b>X</b>
<b>ORDLISTE</b> .....	<b>XII</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>13</b>
1.1 BAKGRUNN OG MÅLSETTING .....	13
1.2 RAPPORTENS STRUKTUR.....	14
<b>2 SMÅKRAFT</b> .....	<b>15</b>
2.1 SMÅKRAFT I NORGE.....	15
2.2 GENERATOR OG MAGNETISERINGSSYSTEM.....	16
2.2.1 Rotor og magnetiseringssystem .....	16
2.2.2 Stator og ekvivalentskjema.....	17
2.2.3 Svingmasse .....	18
2.2.4 Generelle krav til generatorutrustning .....	19
<b>3 STABILITETSTEORI</b> .....	<b>20</b>
3.1 HVA ER POLHJULSVINKELSTABILITET?.....	21
3.2 SMÅ FORSTYRRELSER.....	22
3.3 STORE FORSTYRRELSER .....	23
3.3.1 Generatorreaktanser under store forstyrrelser .....	24
3.3.2 Ulike parameteres påvirkning på generatorers transiente stabilitet.....	27
<b>4 TEST AV FRT EGENSKAPER TIL TYPISKE SMÅKRAFTVERK</b> .....	<b>28</b>
4.1 GENERATORER OG MODELLERING.....	29
4.1.1 Verifisering av modell med Rasdalen kraftstasjon .....	31
4.2 UNDERSØKELSE AV FRT EGENSKAPENE TIL SMÅKRAFTGENERATORER .....	32
4.3 STUDIE AV ULIKE PARAMETRES PÅVIRKNING PÅ GENERATORENES STABILITET .....	35
4.3.1 Modell .....	35
4.3.2 Svingmasse .....	37
4.3.3 Synkronreaktans $x_d$ .....	38
4.3.4 Synkronreaktans $x_q = x'_q$ .....	39

4.3.5	<i>Transient reaktanser <math>x'_d</math></i> .....	40
4.3.6	<i>Subtransient reaktanser <math>x''_d</math> og <math>x''_q</math></i> .....	41
4.3.7	<i>AVR</i> .....	42
4.3.8	<i>Dårlig tunet AVR</i> .....	43
4.3.9	<i>Effektproduksjon før feil - P</i> .....	44
4.3.10	<i>Effektproduksjon før feil – Q</i> .....	45
4.3.11	<i>Generatorsvigninger</i> .....	46
4.3.12	<i>Last i systemet</i> .....	49
4.3.13	<i>Nettets kortslutningsytelse <math>S''_k</math></i> .....	50
4.3.14	<i>Tidskonstanter</i> .....	51
4.4	<b>KONKLUSJON</b> .....	54
4.4.1	<i>Nettfeil for dimensjonering av generatorer</i> .....	54
4.4.2	<i>Parametres påvirkning på generatorers stabilitet</i> .....	55
4.4.3	<i>Utførelse av dynamiske analyser</i> .....	56
<b>5</b>	<b>MODELLERING AV KRAFTSYSTEMET UNDER EVANGER</b> .....	<b>57</b>
5.1	<b>NETTET RUNDT EVANGER SENTRUM</b> .....	57
5.2	<b>ETABLERING AV NETTMODELL</b> .....	59
5.3	<b>VERIFISERING AV SIMULERINGSMODELL</b> .....	60
5.4	<b>MODELLERING AV SMÅKRAFTVERK</b> .....	61
5.4.1	<i>Synkrongeneratordata</i> .....	61
5.4.2	<i>Turbinregulator (HYGOV)</i> .....	62
5.4.3	<i>Spenningsregulator (AC8B)</i> .....	62
5.5	<b>MODELLERING AV FEIL</b> .....	65
5.5.1	<i>Modell med eksisterende generatorer</i> .....	65
5.5.2	<i>Modell inkludert nye generatorer</i> .....	67
<b>6</b>	<b>DYNAMISK ANALYSE AV SMÅKRAFTPRODUKSJON I EVANGER</b> .....	<b>68</b>
6.1	<b>GENERATORENES TRANSIENTE STABILITET</b> .....	69
6.1.1	<i>Vurdering av generatordata</i> .....	72
6.1.2	<i>Tiltak til de ustabile småkraftverkene</i> .....	73
6.2	<b>GENERATORENES STASJONÆRE STABILITET</b> .....	75
6.3	<b>PROSESS FOR DIMENSJONERING AV NYE GENERATORER</b> .....	76
6.3.1	<i>Vurdering av parametre</i> .....	76



6.3.2	<i>Iterasjonsprosess</i> .....	77
6.4	DIMENSJONERING AV NYE GENERATORER .....	78
6.4.1	<i>Tverrelvi kraftstasjon</i> .....	78
6.4.2	<i>Togrovi kraftstasjon</i> .....	79
6.4.3	<i>Storelvi kraftstasjon</i> .....	80
6.4.4	<i>Bjørndalen kraftstasjon</i> .....	81
6.4.5	<i>Hjørnevik kraftstasjon</i> .....	82
6.5	GENERATORENES PÅVIRKNING PÅ EKSISTERENDE NETT .....	83
6.6	KONKLUSJON .....	85
6.6.1	<i>Eksisterende nett</i> .....	85
6.6.2	<i>Nye generatorer</i> .....	85
6.7	VIDERE ARBEID .....	85
<b>7</b>	<b>DISKUSJON OG KONKLUSJON</b> .....	<b>86</b>
7.1	HVA ER GJORT? .....	86
7.2	DISKUSJON AV RESULTATER .....	87
7.3	HELHETLIG VURDERING OG KONKLUSJON .....	88
<b>8</b>	<b>REFERANSER</b> .....	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>VEDLEGG</b> .....	<b>91</b>

## TABELLER

TABELL 3.1 TYPISKE GENERATORDATA BASERT PÅ DATAINNSAMLINGEN. ....	26
TABELL 3.2 ULIKE PARAMETERES PÅVIRKNING PÅ GENERATORENS TRANSIENTE STABILITET. [19] .....	27
TABELL 4.1 GENERATORDATA TIL G01-G10. ....	29
TABELL 4.2 GENERATORDATA TIL G11-G20. ....	29
TABELL 4.3 RESULTATER FRA SIMULERINGER AV RASDALEN KRAFTSTASJON I TO BUSS SYSTEM- MODELLEN. ....	31
TABELL 4.4 RESULTAT AV FRT-UNDERSØKELSEN. GENERATORENE ER INNSTILT MED KAPASITIV DRIFT. .....	33
TABELL 4.5 RESULTAT AV FRT-UNDERSØKELSEN. GENERATORENE ER INNSTILT MED INDUKTIV DRIFT.	33
TABELL 4.6 PARAMETRE SOM SKAL STUDERES. ....	35
TABELL 4.7 ØKING AV TREGHETSMOMENT PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. J ER I [KGM <sup>2</sup> ]. H ER I [WS/VA]. ....	37
TABELL 4.8 RESULTAT FRA SIMULERING MED OG UTEN ØKT SVINGMASSE PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	37
TABELL 4.9 REDUSERING AV $x_D$ PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	38
TABELL 4.10 RESULTAT FRA SIMULERING MED OG UTEN SENKING I $x_D$ PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. .....	38
TABELL 4.11 REDUSERING $x_Q$ OG $x'_Q$ PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	39
TABELL 4.12 RESULTAT FRA SIMULERING MED OG UTEN SENKING I $x_Q$ OG $x'_Q$ PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	39
TABELL 4.13 REDUSERING $x'_D$ PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	40
TABELL 4.14 RESULTAT FRA SIMULERING MED OG UTEN SENKING $x'_D$ PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. .....	40
TABELL 4.15 REDUSERING I $x''_D$ OG $x''_Q$ PÅ GENERATORENE G12, G13 OG G14. ....	41
TABELL 4.16 RESULTAT FRA SIMULERING MED OG UTEN SENKING I $x''_D$ OG $x''_Q$ PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	41
TABELL 4.17 SIMULERINGER UTFØRT MED OG UTEN SPENNINGSREGULATOR PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	42
TABELL 4.18 RESULTAT FRA SIMULERING UTEN SPENNINGSREGULATOR PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	42
TABELL 4.19 SIMULERINGER UTFØRT MED OG UTEN AVR TUNET INNEN OG UTENFOR KRAV PÅ GENERATOR G12. ....	43
TABELL 4.20 RESULTAT FRA SIMULERING MED GODT OG DÅRLIG TUNET AVR PÅ GENERATOR G12. ....	43
TABELL 4.21 REDUSERING I PRODUKSJON AV AKTIV EFFEKT PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	44
TABELL 4.22 RESULTAT FRA SIMULERING MED HALV OG FULL PRODUKSJON AV AKTIV EFFEKT PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	44
TABELL 4.23 FORBRUK AV REAKTIV EFFEKT PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	45
TABELL 4.24 RESULTAT FRA SIMULERING MED REAKTIV EFFEKT PRODUKSJON, TILSVARENDE $\cos \phi = 0,9$ OG $-0,95$ , PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. ....	45
TABELL 4.25 SIMULERING AV GENERATOR SOM SVINGER MED OG MOT GENERATORENE G12, G13 OG G14. ....	46
TABELL 4.26 RESULTAT FRA SIMULERINGENE MED G15 OG G16 INNE. HØYESTE UTSVING I ANDRE HALVPERIODE ER PRESENTERT. ....	47
TABELL 4.27 REDUKSJON AV LAST I NETTMODELLEN. ....	49

TABELL 4.28 RESULTAT FRA SIMULERINGENE MED HØY OG LAV LAST I NETTEMODELLEN. ....	49
TABELL 4.29 REDUKSJON AV KORTSLUTNINGSBIDRAG FRA MATENDE NETT.....	50
TABELL 4.30 RESULTAT FRA SIMULERINGENE MED HØYT OG LAVT KORTSLUTNINGSBIDRAG FRA MATENDE NETT.....	50
TABELL 4.31 REDUSERING TIDSKONSTANTER PÅ GENERATOR G12. ....	51
TABELL 4.32 REDUSERING TIDSKONSTANTER PÅ GENERATOR G13. ....	52
TABELL 4.33 REDUSERING TIDSKONSTANTER PÅ GENERATOR G14. ....	53
TABELL 4.34 RESULTAT FRA STUDIE AV PARAMETRES PÅVIRKNINGSKRAFTEN PÅ GENERATORENES STABILITET.....	55
TABELL 5.1 OVERSIKT OVER EKSISTERENDE OG AKTUELLE SMÅKRAFTVERK I TILKNYTNING TIL EVANGER. ....	58
TABELL 5.2 LASTEN I MODELLEN.....	60
TABELL 5.3 SAMMENLIGNING AV NODESPENNINGER MELLOM VOSS SIN CASCADEMODELL OG PSS@SINCAL MODELL.....	60
TABELL 5.4 SAMMENLIGNING AV KORTSLUTNINGSSTRØM MELLOM VOSS SIN CASCADEMODELL OG PSS@SINCAL MODELL.....	60
TABELL 5.5 KOMPONENTDATA FOR SMÅKRAFTVERKENE.....	61
TABELL 5.6 DYNAMISKE PARAMETRE TIL NYE GENERATORENE. ....	62
TABELL 5.7 RESULTAT FRA LASTFLYTANALYSE I MODELL MED KUN EKSISTERENDE GENERATORER. ....	66
TABELL 5.8 SAMMENLIGNING AV RESULTATER FRA LASTFLYTANALYSE I MODELL MED NYE GENERATORER ALENE I NETTET OG MED ALLE KOBLET INN SAMTIDIG. P ER I [kW]. Q ER I [kVAR]. ....	67
TABELL 6.1 FEILKLARERINGSSTIDEN TIL DE USTABILE SMÅKRAFTVERKENE.....	71
TABELL 6.2 VURDERING AV PARAMETRENE TIL SMÅKRAFTVERKENE. BENEVNING TIL H ER WS/VA.....	72
TABELL 6.3 PARAMETRE MED STOR PÅVIRKNINGSKRAFT PÅ GENERATORENES TRANSIENTE STABILITET.73	
TABELL 6.4 ØKING I SVINGMASSE PÅ USTABILE GENERATORER. J ER OPPGITT I [KGM <sup>2</sup> ] OG H ER OPPGITT I [WS/VA].....	73
TABELL 6.5 REDUKSJON AV INDUKTIV DRIFT PÅ USTABILE GENERATORER.....	74
TABELL 6.6 RESULTATER FRA STASJONÆRANALYSEN I EKSISTERENDE NETT. ....	75
TABELL 6.7 UTGANGSPUNKT VERDIER PÅ NYE GENERATORER.....	76
TABELL 6.8 DIMENSJONERING AV TVERRELVI KRAFTSTASJON.....	78
TABELL 6.9 DIMENSJONERING AV TOGROVI KRAFTSTASJON. ....	79
TABELL 6.10 ANDRE ITERASJONER MED $x_D = 1,2$ - TOGROVI KRAFTSTASJON.....	79
TABELL 6.11 DIMENSJONERING AV STORELV KRAFTSTASJON. ....	80
TABELL 6.12 DIMENSJONERING AV BJØRNDALEN KRAFTSTASJON.....	81
TABELL 6.13 DIMENSJONERING AV HJØRNEVIK KRAFTSTASJON.....	82
TABELL 6.14 FEILKLARERINGSSTID PÅ USTABILE GENERATORER, MED OG UTEN NY PRODUKSJON. ....	83
TABELL 6.15 SAMMENLIGNING MELLOM SPENNINGS DIP PÅ RADIALENE MED OG UTEN NY PRODUKSJON. 84	

## FIGURER

FIGUR 2.1 ILLUSTRASJONER AV ROTOR MED UTPREGEDE POLER.[7] .....	16
FIGUR 2.2 ILLUSTRASJON AV STATISK (A) OG BØRSTELØS (B) MAGNETISERINGSSYSTEM (REDIGERT). [8] .....	17
FIGUR 2.3 TREFASE- OG ENFASEEKVIVALENT AV STATOR. [12].....	17
FIGUR 2.4 HVORDAN SVINGHJUL SER UT I PRAKSIS. [10] .....	18
FIGUR 3.1 USTABILITET I IKKE-OSCILLERENDE MODUS (A) OG I OSCILLERENDE MODUS (B).[15].....	22
FIGUR 3.2 POLHJULSVINKELRESPONS TIL EN TRANSIENT FORSTYRRELSE. ....	23
FIGUR 3.3 TURTALLSRESPONS ETTER EN TRANSIENT FORSTYRRELSE. STIPLSET KURVE VISER DEMPINGEN UTREGNET MED SMÅSIGNALANALYSE.....	24
FIGUR 3.4 FORENKLET ROTOR MED UTPREGET POLER (A) OG VARIASJON I RELUKTANS RUNDT ROTORENS PERIFERI. [8].....	25
FIGUR 3.5 FLUKSBANE GJENNOM Q- OG D-AKSEN VED SAMME POSISJON UNDER SUBTRANSIENT, TRANSIENT OG STASJONÆR PERIODE. ....	25
FIGUR 4.1 SIMULERINGSMODELL I FRT-STUDIEN.....	30
FIGUR 4.2 SIMULERINGSMODELL VED STUDIE AV ULIKE PARAMETERES PÅVIRKNING PÅ GENERATORENS TRANSIENTE STABILITET.....	35
FIGUR 4.3 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 ETTER FEIL MED 20 % RESTSPENNING VARIGHET 200 MS.....	36
FIGUR 4.4 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 MED ØKT SVINGMASSE.....	37
FIGUR 4.5 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 MED REDUSERT $x_d$ . ....	38
FIGUR 4.6 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 MED ØKT $x_q$ OG $x'_q$ .....	39
FIGUR 4.7 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 MED REDUSERT $x'_d$ .....	40
FIGUR 4.8 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 MED REDUSERT $x''_d$ OG $x''_q$ .....	41
FIGUR 4.9 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 UTEN SPENNINGSREGULERING. ....	42
FIGUR 4.10 GODT OG DÅRLIG TUNET AVR.....	43
FIGUR 4.11 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 VED HALV PRODUKSJON AV AKTIV EFFEKT. ....	44
FIGUR 4.12 SVINGERESPONS TIL GENERATORERENE VED REAKTIV EFFEKT PRODUKSJON TILSVARENDE $\cos \phi = -0,95$ .....	45
FIGUR 4.13 SVINGERESPONS TIL GENERATORENE MED G16 LIGGENDE INNE.....	46
FIGUR 4.14 SVINGERESPONS TIL GENERATORENE MED G15 LIGGENDE INNE.....	47
FIGUR 4.15 UTKLIPP FRA SVINGERESPONS MED GENERATORENE LIGGENDE ALENE I NETTET, G16 INNE OG G15 INNE.....	47
FIGUR 4.16 UTKLIPP AV SVINGERESPONS MED G16 INNE. VISER HVORDAN G14 PÅVIRKES NÅR G16 SVINGER IMOT. ....	48
FIGUR 4.17 SVINGERESPONS TIL GENERATORENE MED LAVT KORTSLUTNINGSBIDRAG FRA MATENDE NETT.....	50
FIGUR 4.18 SVINGERESPONS TIL G12 MED OG UTEN REDUSERTE TIDSKONSTANTER. ....	51
FIGUR 4.19 SVINGERESPONS TIL G13 MED OG UTEN REDUSERTE TIDSKONSTANTER. ....	52
FIGUR 4.20 SVINGERESPONS TIL G14 MED OG UTEN REDUSERTE TIDSKONSTANTER. ....	53
FIGUR 5.1 GEOGRAFISK Plassering av småkraftverkene.....	58
FIGUR 5.2 FORENKLET UTGAVE AV SIMULERINGSMODELLEN.....	59
FIGUR 5.3 BLOKKSJEMA TIL AC8B. [23].....	62
FIGUR 5.4 FERDIGTUNET SPRANGRESPONS I SPENNING FRA 100 % $\rightarrow$ 105 %.....	63

FIGUR 5.5 FERDIGTUNET SPRANGRESPONS I SPENNING FRA 100 % →95 %.....	64
FIGUR 5.6 FORENKLET SIMULERINGSMODELL MED FEIL.....	65
FIGUR 5.7 SPENNING ULIKE STEDER I NETTET UNDER FEIL.....	66
FIGUR 5.8 DRIFTSDIAGRAM.....	67
FIGUR 6.1 RESPONS TIL EKSITERENDE GENERATORER ETTER DIMENSJONERENDE FEIL I ÆVANGER TRANSFORMATORSTASJON.....	70
FIGUR 6.2 ITERASJONSPROSESS FOR DIMENSJONERING AV NYE GENERATORER.....	77
FIGUR 6.3 SPENNINGS DIP PÅ RADIALENE MED DIMENSJONERENDE FEIL I ÆVANGER TRAFOSTASJON. ....	84

## ORDLISTE

- **Fault Right Through (FRT):** Beskriver generatorens evne til å holde seg synkronisert med nettet under en feilsituasjon (fall i spenning).
- **FRT-studien:** Studie av FRT-egenskaper til generatorer som gjennomføres i *Kapittel 4: Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk*
  - o **FRT-undersøkelsen:** Undersøkelse av 20 generatorer som gjennomføres i *Kapittel 4.2: Undersøkelse av FRT egenskapene til småkraftgeneratorer.*
- **Voss-studien:** Dynamisk analyse av distribusjonsnettet til Voss Evanger i Evanger. Gjennomføres i *Kapittel 6: Dynamisk analyse av småkraftproduksjon i Evanger.*
- **Datainnsamlingen:** Generatordata på 62 generatorer fra tidligere studier av Siemens PTI.
- **Undermagnetisert/induktiv drift:** Driftsituasjon hvor generatorene trekker reaktiv effekt fra nettet. Negativ effektfaktor.
- **Overmagnetisert/kapasitiv drift:** Driftsituasjon hvor generatorene leverer reaktiv effekt til nettet. Positiv effektfaktor.
- **Dimensjonerende feil:** Feilsituasjon som settes som krav til transient stabilitet på generatorene. Valg av denne vil bli diskutert i FRT-studien.
- **Konservativ analyse:** Studie hvor det er lagt inn strenge krav som gir marginer for feilkilder. Resultatene skal sikre at generatorene ikke blir feildimensjonerte.
- **Feilklareringstid:** Maksimal varighet på feil, med satt restspenning, før generator blir ustabil.
- **Dempetilsats/Power System Stabilizer (PSS):** Et supplement til spenningsregulatoren. Inndata kan typisk være aktiv effekt og turtall. Slik kan også disse påvirke reguleringen av feltstrømmen.

# 1 INNLEDNING

## 1.1 Bakgrunn og målsetting

I distribusjonsnettet rundt tettstedet Evanger i Voss kommune er det i dag 11 småkraftverk som enten er i drift, under bygging eller venter konsesjonsbehandling. Dette kan gi stasjonære og dynamiske utfordringer for netteier Voss Energi. De ønsker derfor en analyse for å avklare hvilke krav en bør stille til produksjonsenhetene.

Oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven, hvor hovedformålet var å bygge opp nettmodell av Voss Energi sitt nett. Det er nå utført en dynamisk analyse av det eksisterende nettet. I tillegg er det gitt forslag til dimensjonering av reaktanser og svingmasse på generatorene som venter konsesjonsbehandling.

Forutsetninger og vurderinger i nettanalysen vil basere seg på FRT-studien som gjennomføres i kapittel 4. Her vil 20 generatorer fra en datainnsamling av 62 generatorer bli testet i et tobussystem. Denne studien vil brukes til å diskutere feilsituasjon og forutsetninger i Voss-studien og tilsvarende nettanalyser. Generatorene i datainnsamlingen vil bli hentet fra datablader fra tidligere analyser gjort av Siemens PTI.

Alle dynamiske simuleringer vil bli gjort i PSS®SINCAL og PSS®NETOMAC. Matlab og Microsoft Office Excel 2007 vil bli brukt til å bearbeide resultater. Oppgaven er skrevet i Microsoft Office Word 2007.

## 1.2 Rapportens struktur

Det er ved hvert kapittel gitt en beskrivelse av hva leseren vil finne i kapitlet. Dette for å forbedre leseropplevelsen og spare leseren for unødvendig leting etter relevant stoff. Under er rapportens struktur vist.

- Kapittel 2: **Småkraft** gir en introduksjon til småkraftverk. Generator-teori blir gjennomgått.
- Kapittel 3: **Stabilitetsteori** gir en kort gjennomgang av stabilitetsteori som er relevant for studien. Generatorparametre blir beskrevet.
- Kapittel 4: **Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk** inneholder modellering, resultater og konklusjoner til FRT-studien. Dimensjonerende feil brukt i Voss-studien blir valgt her.
- Kapittel 5: **Modellering av kraftsystemet under Evanger** beskriver hvordan nettmodellen er bygd opp. Innledningsvis beskrives planområdet og småkraftverkene.
- Kapittel 6: **Dynamisk analyse av småkraftproduksjon i Evanger** inneholder resultater og konklusjoner til Voss-studien.
- Kapittel 7: **Diskusjon og konklusjon** oppsummerer og diskuterer resultater fra FRT- og Voss-studien. Det blir også diskutert håndtering av usikkerheter i dynamiske nettanalyser som kan føre til feildimensjonering av generatorer.



## 2 SMÅKRAFT

I dette kapittelet vil teori rundt småkraft og generator bli gjennomgått. Først vil en introduksjon definere småkraft, forklare prosessen for utbygging og beskrive noen utfordringer. Videre vil generator med svingmasse og magnetiseringsutrusting bli beskrevet. Til slutt vil noen generelle krav til generator gjennomgås. For mer utfyllende beskrivelse av småkraft, herunder byggekostnader, usikkerhetsfaktorer ved utbygging, valg av generator med mer, henvises det til prosjektoppgaven [1].

### 2.1 Småkraft i Norge

Det moderne Norge ble bygd og industrialisert gjennom at vi klarte å ta i bruk elver og fossefall til kraftproduksjon. Vannkraft er fortsatt bærebjelken i det norske kraftsystemet. Det er også, ved siden av olje- og gassteknologi, et av de få områdene hvor Norge er blant de teknologisk ledende i verden.[2]

Små vannkraftverk er en fellesbetegnelse på vannkraftverk mindre enn 10 MW. Disse kan deles inn i mikrokraftverk ( $< 0,1$  MW), minikraftverk (0,1-1 MW) og småkraftverk (1-10 MW). [3]

For småkraftverk er det NVE som sier ja eller nei til tillatelse til kraftutbygging. Denne konsesjonsbehandling består av en helhetlig vurdering hvor de ser på positive og negative konsekvenser for både allmenne og private interesser ved en utbygging av kraftverket. [4]

Energiloven § 3-4 pålegger nettselskapene tilknytningsplikt for konsesjonsgitt produksjon. Hvis analyser viser at tilknytning av ny produksjon samlet sett ikke er samfunnsøkonomisk lønnsomt kan (og bør) netteier søke om fritak. [5]

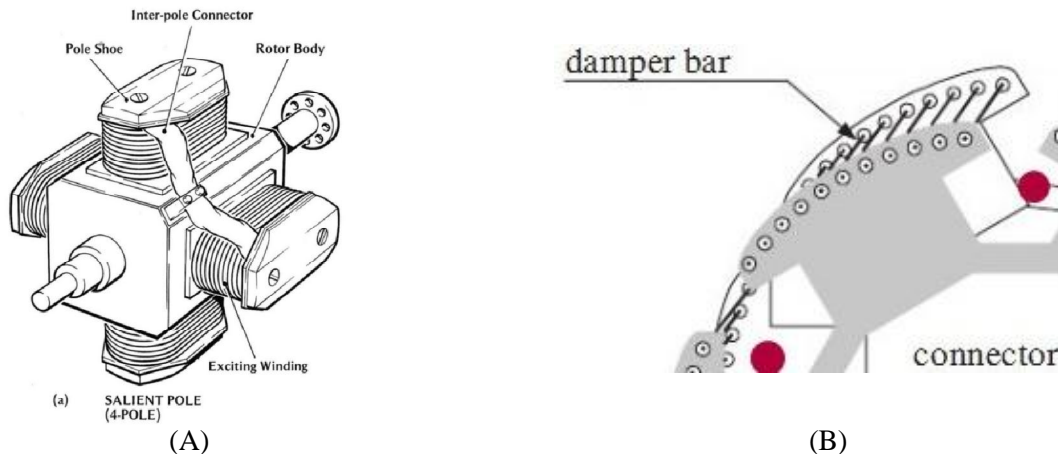
Innføring av småkraft i et eksisterende nett kan gi ulemper fordi det introduseres en toveis effektflyt. Tradisjonelt er distribusjonsnettet i Norge drevet som radialnett med kun enveis effektflyt. Dette fører til at spenningen er lavere lengre utover i radialen. Dette strøm- og

spenningsforholdet endrer seg ved innføring av lokal produksjon, slik at komponentene i nettet får endret sine strømpåkjenninger. Dette kan forverre leveringskvaliteten til nettet. I tillegg kan leveringspåliteligheten bli svekket hvis feil og avbrudd økes på grunn av høyere termisk belastning. Sistnevnte avhenger av hvordan tilstanden var i nettet før innkobling av ny produksjon.

## 2.2 Generator og magnetiseringssystem

### 2.2.1 Rotor og magnetiseringssystem

Synkrongeneratoren består av to hovedkomponenter; rotor og stator. Rotor er den roterende delen og inneholder feltviklinger. Figur 2.1 (A) viser en rotor utformet med utpregede poler. (B) viser dempeviklingene<sup>1</sup>. Sammenlignet med sylindrisk utformet rotor, har denne rotortypen høyere diameter og brukes ved lavere turtall.[1] Vannkraftverk driftes med relativt lave turtall og følgelig er denne rotortypen primært brukt.



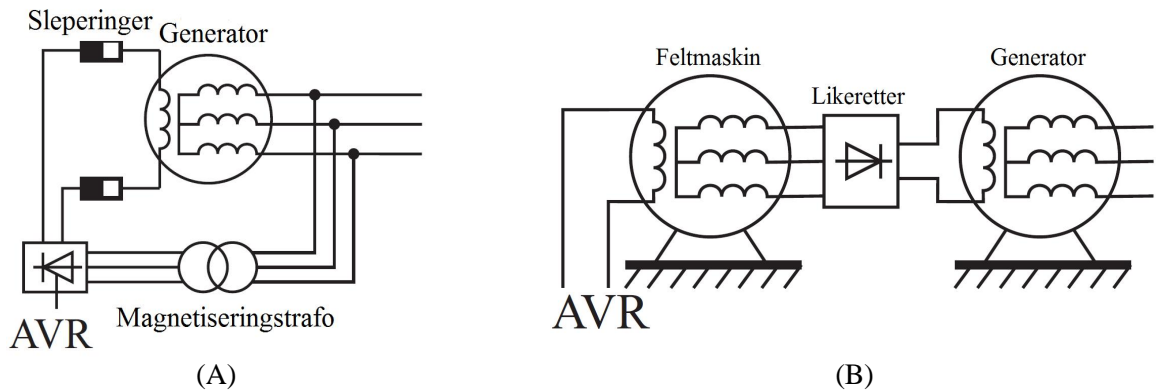
FIGUR 2.1 ILLUSTRASJONER AV ROTOR MED UTPREGEDE POLER.[7]

Feltvikling i rotoren blir magnetisert ved hjelp av likestrøm. Siden rotoren roterer kreves det et system for å tilkoble likestrømskilden. De to vanligste *magnetiseringssystemene* er:

- Statisk magnetisering
  - o Likestrømmen blir forsynt til rotor gjennom sleperinger og børster fra en ekstern statisk kilde.
- Børsteløs magnetisering (roterende)
  - o Likestrømmen forsynes fra en feltmaskin med likeretter montert på akslingen til generatoren.

<sup>1</sup> Dempeviklingen tjener til å dempe mekaniske svingninger i ankerkretsen. Når rotoren svinger ut av sin likevekttilstand, f.eks ved kortslutning, vil det induseres strøm i dempeviklingen som med sitt felt vil virke tilbake på ankerfeltet og derved dempe svingningen. [6]

## Småkraft



FIGUR 2.2 ILLUSTRASJON AV STATISK (A) OG BØRSTELØS (B) MAGNETISERINGSSYSTEM (REDIGERT). [8]

Fordelen med det statiske magnetiseringssystem er hurtig regulering. Derfor har Statnett satt krav om at aggregater over 25 MVA skal ha et slikt magnetiseringssystem.[9] På grunn av kostbar høyspent magnetiseringsstransformator og økt vedlikehold (børstestøv i aggregatet) benyttes børsteløs magnetisering nesten utelukkende i småkraftverk i dag. [10]

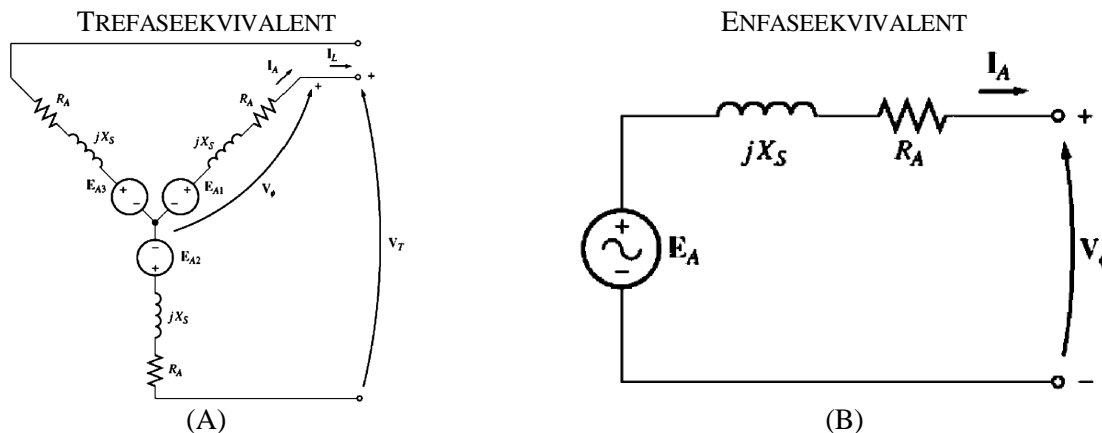
Feltstrømmen vil sette opp et rotorfelt som vil indusere spenning i stator. Dette betyr at klemmespenningen på generator styres av magnetiseringskretsen. For å oppnå en stabil spenning på klemmene styres feltstrømmen av en spenningsregulator (AVR).

### 2.2.2 Stator og ekvivalentkjema.

Stator er den statiske delen av synkrogeneratoren og er tilknyttet nettet. Den består av tre faseviklinger som alltid er koblet i stjerne med jordet nøytralpunkt.[11] Dette gir følgende fordeler:

- Fasespenningen blir kun 58 % ( $1/\sqrt{3}$ ) av linjespenningen. Dette senker behovet for isolasjon i statorhussporene slik at tverrsnittet på lederne kan økes.
- Tredjeharmoniske spenninger indusert blir kansellert. Følgelig vil linjespenning forbli sinusformet under alle lastbetingelser.

Figur 2.3 viser statorens trefase- og enfaseekvivalentkrets.



FIGUR 2.3 TREFASE- OG ENFASEEKVIVALENT AV STATOR. [12]

### 2.2.3 Svingmasse

Svingmasse på aggregatet beskriver tregheten til systemet. Stor svingmasse reduserer påkjenningene på generatoren i forbindelse med lastavslag og nettutfall. For noen turbintyper vil også svingmassen redusere trykkstøt i vannveien.[13]

Kravet til svingmasse på generatoren defineres som regel ut fra tidskonstanten  $T_a$ , som er tiden det tar å akselerere generatoren fra stillstand til nominelt turtall, med et moment som er lik turbinens merkemoment. Denne er, for vanlige småkraftverk, typisk 1,0 -1,5 s. [10]

Treghetskonstanten,  $H$ , er vanlig benyttet for generatorkonstruktører og er tiden det tar å akselerere maskinen fra stillstand til nominelt turtall med en effekt som er lik maskinens merkeytelse. Den er ved å sette  $kW = MVA$  lik  $T_a/2$ , som tilsvarer 0,5-0,75 Ws/VA for typiske småkraftverk.

Hvis det er satt krav til høy svingmasse på generatoren kan det bli kostbart og medføre store utfordringer for generatorkonstruktørene. En billig løsning er da å installere et *svinghjul*. Det er viktig å nevne at det kan være krevende å installere svinghjul hvis det er større enn naturlig svingmasse på generatoren. [10]



FIGUR 2.4 HVORDAN SVINGHJUL SER UT I PRAKSIS. [10]

I datablad vil svingmasse ofte bli beskrevet av treghetsmomentet  $J$  [ $\text{kgm}^2$ ] eller svingmoment  $GD^2$  [ $\text{kgf}\cdot\text{m}^2$ ]. Sammenhengen med disse er vist i linkning 1. Utledningen er vist i Vedlegg F.1.

$$J = \frac{GD^2}{4} \quad (1)$$

## 2.2.4 Generelle krav til generatorutrustning

Generelle krav og anbefalinger til generatorutrustning for småkraft som er relevant for denne studien er listet opp under.

### **Statnett: Funksjonskrav i kraftsystemet (FIKS) 2012 [9]:**

1. Aggregat med ytelse over 10 MVA, samt mindre aggregat der det er mulig, skal ha fullverdig turbinregulator utstyrt for aktiv frekvensregulering.
2. Synkrongeneratorer med ytelse  $\geq 0,5$  MVA skal ha spenningsregulering av PID-type.
3. Børsteløse maskiner med roterende diodebru som magnetiseringssystem må være nådd 90 % av endelig stasjonær verdi innen 1 s. I tillegg må maksimal oversving og undersving være  $< 15$  % av total endring. Responsen skal ikke være oscillerende.

### **Sintef: Tekniske retningslinjer for tilknytning av produksjonsenheter, med maksimum aktiv effektproduksjon mindre enn 10 MW, til distribusjonsnett [3]:**

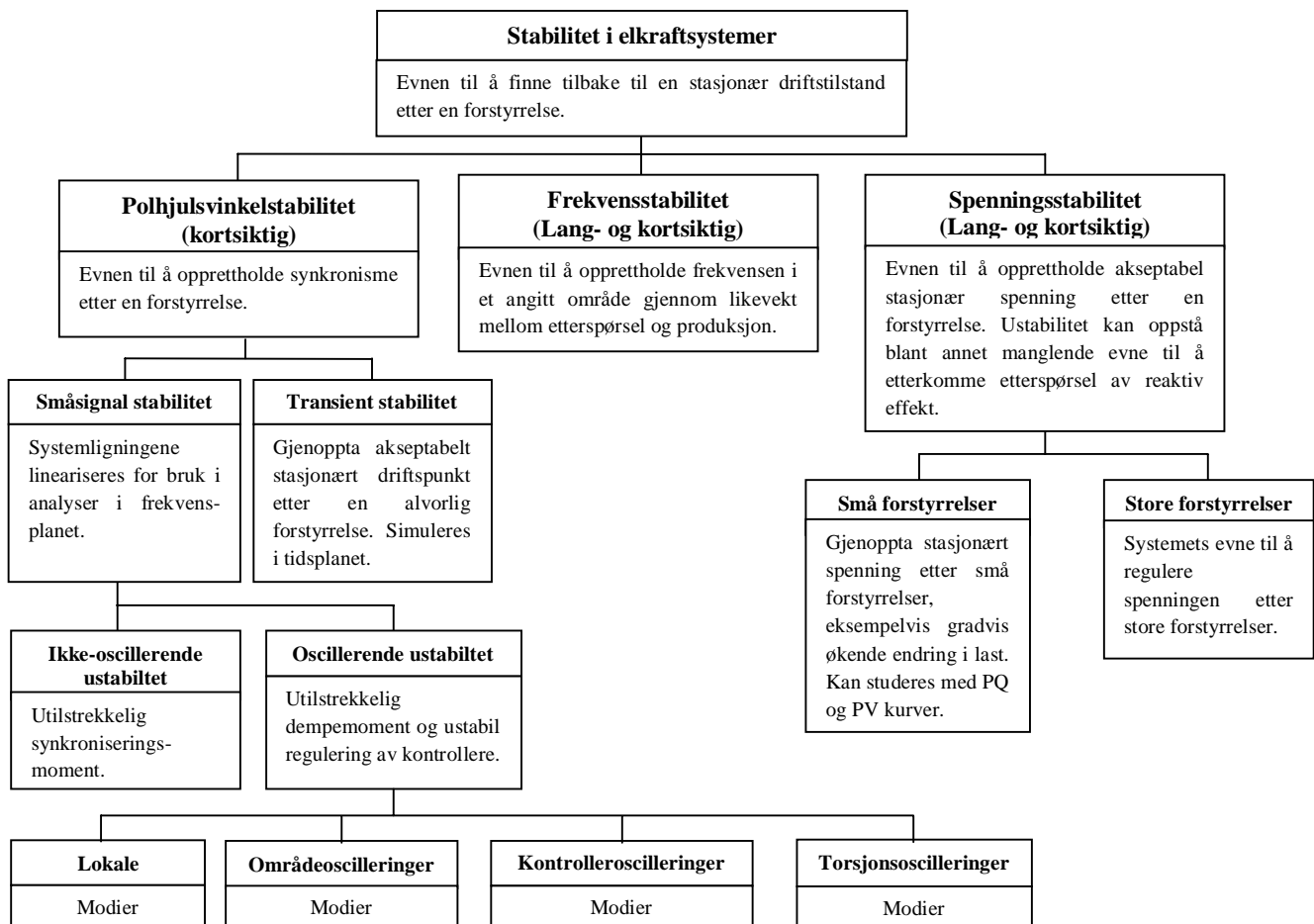
4. Maksimum frakoblingstid på spenning  $U > 1,15$  pu er 0,2 s.  $U > 1,1$  pu er 1,5 s og  $U < 0,85$  pu er 1,5 s

### **Rasjonell elektrisk nettvirkosomhet (REN) [14]:**

5. Dempningsforholdet  $\zeta$  for elektromekaniske svingninger skal være minst 5 %.
6. Standard krav til generatorens effektfaktorband:  $-0,33 < \tan \varphi < 0,48$

# 3 STABILITETSTEORI

I dette kapittelet vil stabilitetsteori relevant for studien bli gjennomgått. I denne studien vil det bli sett på polhjulsvinkelstabilitet i både tids- og frekvensplanet. Dette for å kartlegge hvordan småkraftverkene oppfører seg under store og små forstyrrelser i nettet. Til slutt beskrives generatorens oppførsel under feil og påvirkningskraften ulike parametre har på generatorens transiente stabilitet.



### 3.1 Hva er polhjulsinkelstabilitet?

Polhjulsinkelstabilitet relateres til generatorenes evne til å forbli synkronisert etter å bli utsatt for en forstyrrelse bort fra operasjonspunktet. En slik forstyrrelse gir endring i generatorens *polhjulsinkel*,  $\delta$ , som er en vinklet separasjon mellom det roterende magnetiske feltet i rotor og stator. Som vist i likning 2 vil en forstyrrelse føre til turtallsendring på generatorene.

$$\omega_m = \omega_{sm} + \Delta\omega_m = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2)$$

$\omega_m$  = rotorhastighet

$\omega_{sm}$  = synkron hastighet

$d\delta_m$  = endring i polhjulsinkel

Slike forstyrrelser kan oppstå på grunn av:

- Økt produksjon fra et kraftverk.
- Lastavslag.
- Kortslutning.

Stabilitetsteorien er basert på Newtons andre lov og beskriver hvordan summen av krefter er produktet av masse og akselerasjon. Likning 3 viser hvordan momentbalansen vil påvirke turtallet til generatoren.

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + D_d \omega_m = \tau_{turbin} - \tau_{elektrisk} \quad (3)$$

$J$  = Treghetsmoment

$D_d$  = Dempekoeffisient

$\tau_{turbin}$  = momentet til turbinen

$\tau_{elektrisk}$  = elektromagnetisk moment

## 3.2 Små forstyrrelser

Små forstyrrelse oppstår kontinuerlig i elkraftsystemer på grunn av variasjoner i last og produksjon. Disse forstyrrelsene vil ikke gi stor endring i polhjulsvinkelen slik at likning 3 kan lineariseres. Det vil si fjerne  $J \cdot d\omega_m/dt$  fra ligningen. Den kan videre omskrives til et uttrykk for det elektromagnetiske momentet til generatoren etter en forstyrrelse, vist i likning 4.

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (4)$$

$\Delta T_e$  = elektromagnetiske momentet

$T_s \Delta \delta$  = synkroniseringsmomentet

$T_D \Delta \omega$  = dempemomentet

Små forstyrrelser kan føre til ustabilitet i to forskjellige former:

- Stasjonær økning i rotorvinkel på grunn av mangel av tilstrekkelig synkroniseringsmoment.
  - o Dette kan oppstå ved fravær av AVR (konstant feltstrøm) i et system. Det vil føre til ustabilitet i en ikke-oscillerende form eller *modus* og er vist i Figur 3.1 (A).
- Rotoroscillasjoner med økende amplitude på grunn av mangel av tilstrekkelig dempemoment.
  - o Dette kan oppstå med AVR i et system. Dette vil føre til ustabilitet i en oscillerende modus og er vist i Figur 3.1 (B).



FIGUR 3.1 USTABILITET I IKKE-OSCILLERENDE MODUS (A) OG I OSCILLERENDE MODUS (B).[15]

En modus er et egenverdi par som regnes ut fra systemlikningene. En reell egenverdi tilsvarer en ikke-oscillerende modus. Et kompleks konjugert egenverdi par tilsvarer en oscillerende modus. Realdelen beskriver dempingen og imaginærdelen beskriver frekvensen til oscillasjonen.

I dag er det er det oscillerende modus som skaper problemer. Oscilleringer som oppstår på grunn av generatorer som svinger mot hverandre ligger i frekvensområdet 0,1 til 2 Hz. Oscilleringer i frekvensområdet 0,1 til 0,5 Hz blir kalt inter-area oscilleringer og er svingninger mellom en gruppe av generatorer i et område som svinger mot en annen gruppe i et annet område. Disse oscillasjonene er vanskelige å dempe.[16]



Oscilleringer i frekvensområdet 1 til 2 Hz blir kalt lokale oscilleringer og er enkeltgeneratorer som svinger mot resten av systemet. De lokale svingningene i småkraft kan bli opptil 20 Hz på grunn av lavere treghetsmoment. [17]

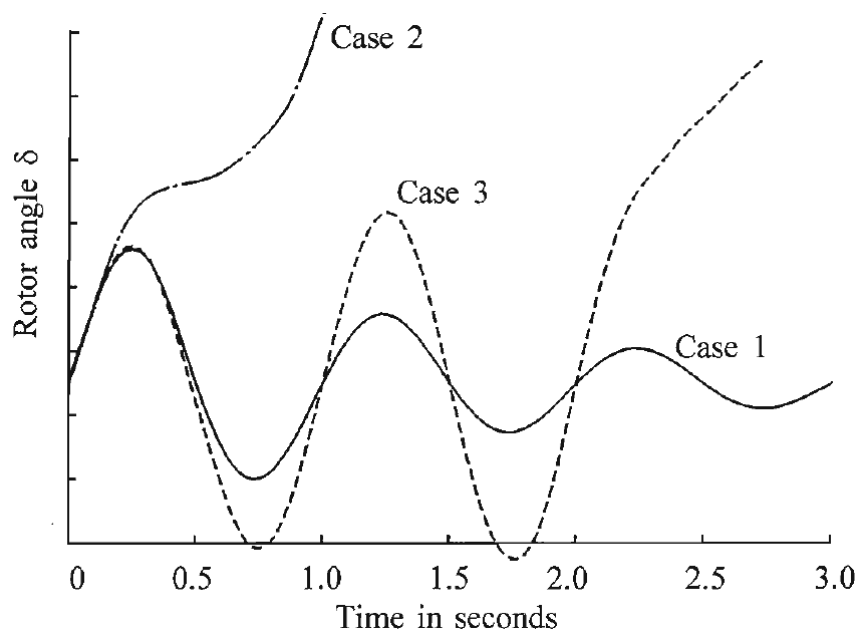
I denne studien vil *småsignalanalysen* bli benyttet for å regne ut modiene til systemet. Deretter blir de analysert for å vurdere hvor godt dempet kraftverkene i modellen er. Det blir gjort vurdering ut ifra dempingsfaktoren,  $\zeta$ , til modusen, som etter kravene fra kapittel 2.2.4 punkt 5 ikke skal være mindre enn 5 %.

En fordel med denne metoden er at det kun trengs én utregning for hver lasttilstand og man slipper å se på forskjellige feilsituasjoner. Det negative er at det kun virker for småsignalstabilitet. I tillegg kan resultatet virke uforståelig for mange.<sup>2</sup>

### 3.3 Store forstyrrelser

Transient stabilitet relateres til store driftsforstyrrelser og knyttes til generatorenes evne til å beholde sin synkronisme med nett og returnere tilbake til normal driftstilstand etter at forstyrrelsen opphører. Denne forstyrrelsen kan for eksempel være en kortslutning i nettet. Polhjulsinkelen endrer seg så mye at ligning 3 ikke kan lineariseres. Man må derfor simulere i tidsplanet og studere hvordan generatorene oppfører seg under forskjellige store forstyrrelser.

I Figur 3.2 illustreres responsen til polhjulsinkelen i tre tilfeller hvor en er transient stabil og to er transient ustabil. I Case 3 er systemet stabilt i første svingning for så å bli ustabil. Slike tilfeller oppstår når stasjonær tilstand etter forstyrrelsen er (småsignal) ustabil, og derfor ikke nødvendigvis som følge av den transiente forstyrrelsen.

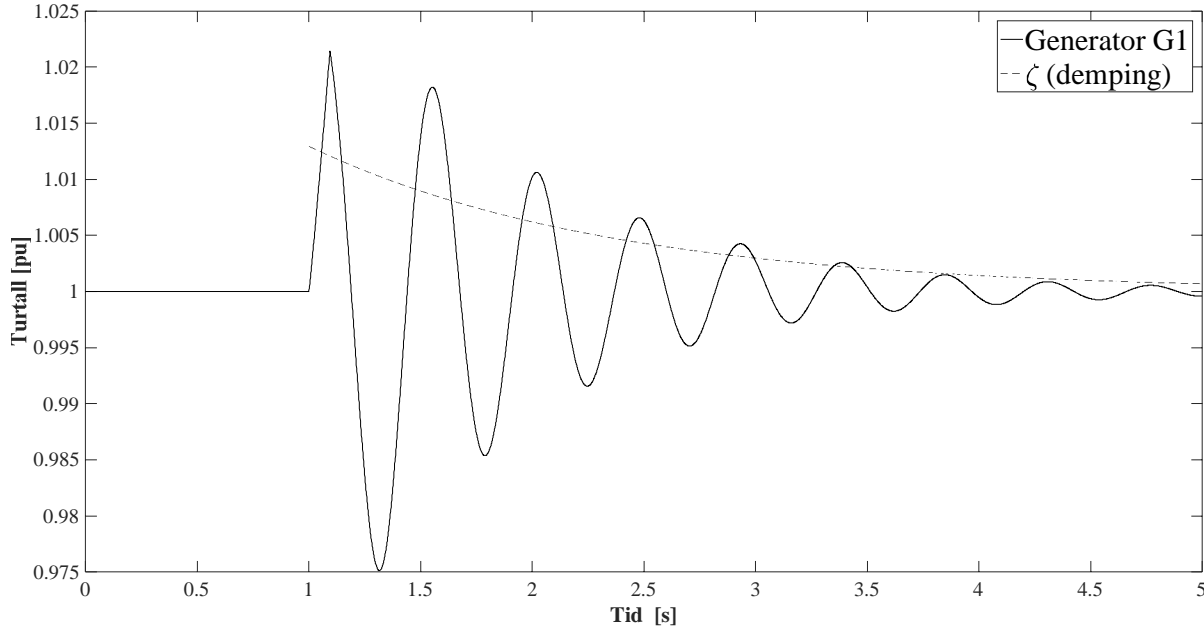


FIGUR 3.2 POLHJULSVINKELRESPONS TIL EN TRANSIENT FORSTYRRELSE.

<sup>2</sup> Dr. Olaf Ruhle i Siemens PTI i Erlangen, Tyskland, beskrev dette som en ulempe ved bruk av småsignalanalyse i presentasjonen "Eigenvalue and Modal Analysis".

## Stabilitetsteori

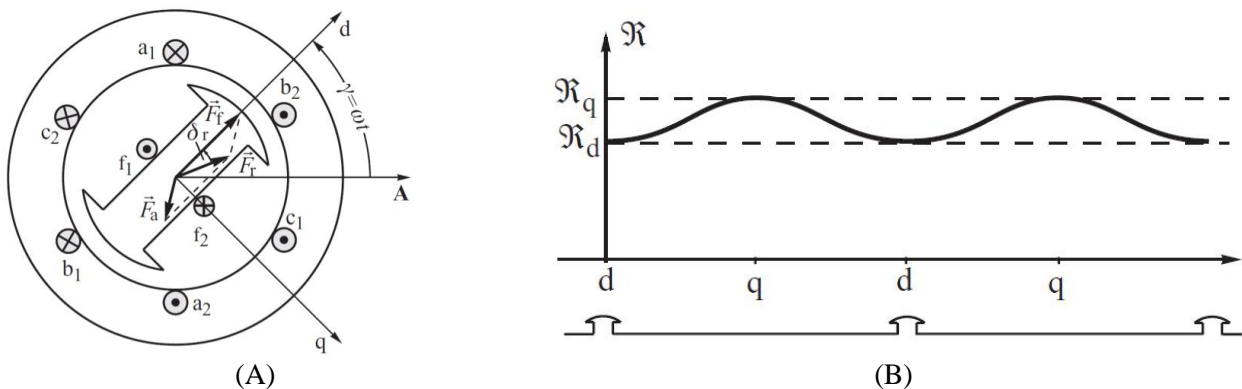
Figur 3.3 viser responsen til en generator etter å ha bli utsatt for en nærliggende trepolt kortslutning. Den stiplede linjen er dempingen regnet ut med småsignalanalysen. Frem til to sekunder etter feilen oppsto, vises det et stort avvik mellom simuleringen i tidsplanet og utregningen av dempingen i frekvensplanet. På grunn av dette kan ikke småsignalanalysen brukes til å bestemme om generatoren er transient stabil.



FIGUR 3.3 TURTALLSRESPONS ETTER EN TRANSIENT FORSTYRRELSE. STIPELET KURVE VISER DEMPINGEN UTREGNET MED SMÅSIGNALANALYSE.

### 3.3.1 Generatorreaktanser under store forstyrrelser

Synkronreaktansen  $x_s$  vist i Figur 2.3 i er invers proporsjonal med reluktansen<sup>3</sup>,  $R$ . Figuren under viser hvordan  $R$  varierer rundt rotor med utpregede poler. Fordi de er invers proporsjonale vil  $x_d > x_q$  fordi  $R_d < R_q$ . Her er  $x_d$  og  $x_q$  reaktansen assosiert med henholdsvis d- og q-aksen<sup>4</sup>.



<sup>3</sup> Magnetisk reluktans eller magnetisk resistans er et konsept som brukes i analyser av magnetiske kretser. Som en analogi til resistans i elektrisk krets angir den minste motstands vei for fluksen. Reluktansen er høy i luft og lav i jern.

<sup>4</sup> d-q aksesystemet har gjennom dq0-transformasjon referert alle maskinens viklinger til rotor. Aksesystemet blir derfor "låst fast" til rotor og brukes for å forenkle analyser.

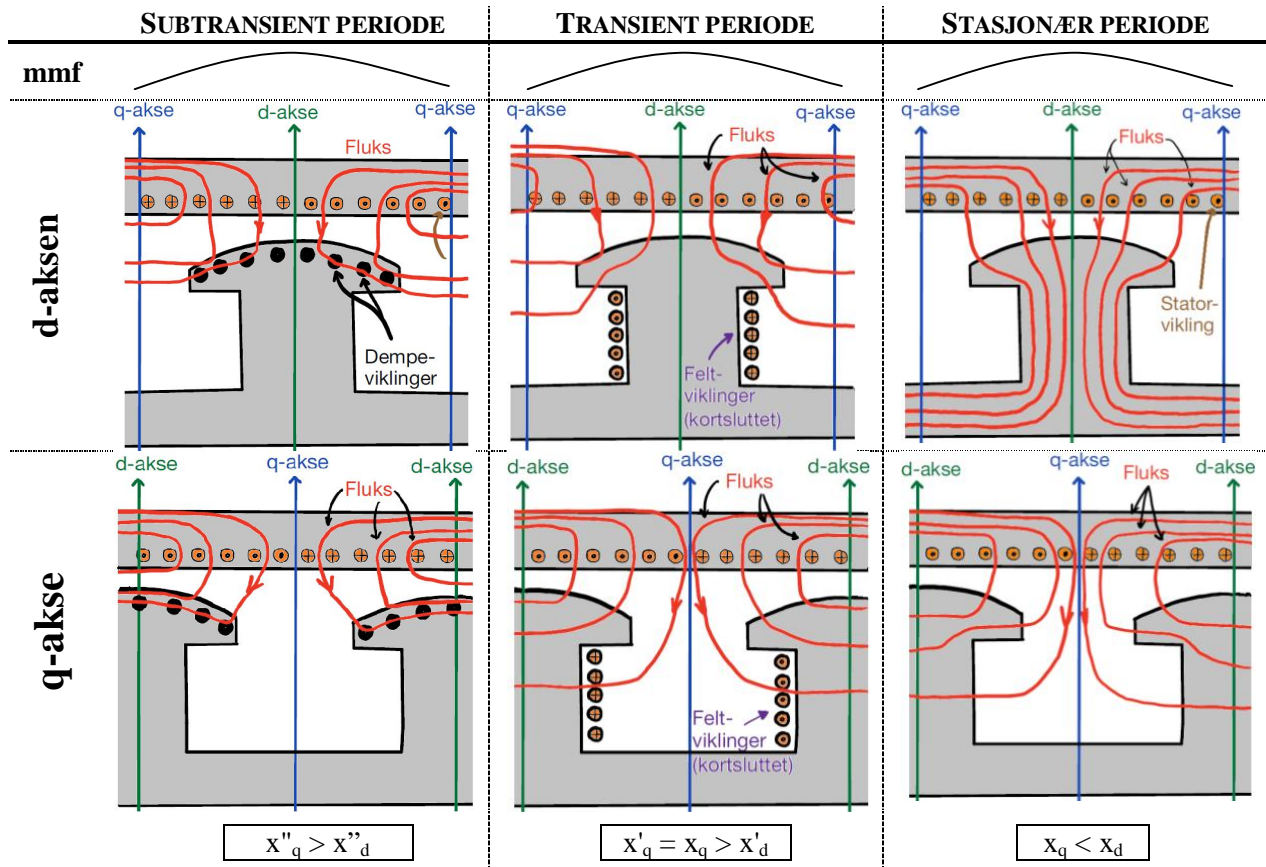
## Stabilitetsteori

FIGUR 3.4 FORENKLET ROTOR MED UTPREGET POLER (A) OG VARIASJON I RELUKTANS RUNDT ROTORENS PERIFERI. [8]

Oppstår det en nærliggende feil i nettet vil induserte strømmer i felt- og dempeviklingen tvinge fluksen til å ta en annen vei gjennom rotor. Dette er vist i Figur 3.5.

I den **subtransiente** og **transiente perioden** vil q-fluksen få mindre luft (lavere R) i sin bane enn d-fluksen. Og følgelig blir reaktansen høyere i q-aksen.

I den **stasjonære perioden** vil den transiente q-fluksen få mer luft (høyere R) i sin bane enn d-fluksen, slik at  $x_d > x_q$ .  $x_q$  har ikke endret seg fra transient periode og vil derfor være lik  $x'_q$ . Dette gjør at den transiente tidskonstanten,  $t'_q$  ikke er gjeldene for generator med utpregede poler.



FIGUR 3.5 FLUKSBANE GJENNOM Q- OG D-AKSEN VED SAMME POSISJON UNDER SUBTRANSIENT, TRANSIENT OG STASJONÆR PERIODE.

## Stabilitetsteori

Fra datainnsamlingen [18] er det gjort statistiske utregninger for å finne typiske parametre for småkraftsgeneratoren med utpregede poler. Utregningene ligger i tabellen under. Parameterverdiene stemmer godt overens med ligningene i Figur 3.5.

**TABELL 3.1** TYPISKE GENERATORDATA BASERT PÅ DATAINNSAMLINGEN.

PARAMETER		MEDIAN	GJENNOMSNITT	STANDARDVVIK
$x''_d$	0,1 – 0,26 pu	0,16 pu	0,16 pu	3,8 %
$x'_d$	0,17 – 0,38 pu	0,25 pu	0,25 pu	5,3 %
$x_d$	0,93 – 3,73 pu	1,58 pu	1,78 pu	66,1 %
$x''_q$	0,11 – 0,85 pu	0,19 pu	0,21 pu	11,8 %
$x'_q$	0,06 – 2,52 pu	1,01 pu	1,14 pu	48,8 %
$x_q$	0,06 – 2,52 pu	1,01 pu	1,14 pu	48,8 %
$t''_d$	0,006 – 0,202 s	0,018 s	0,026 s	2,9 %
$t'_d$	0,04 – 1,16 s	0,41 s	0,43 s	21,8 %
$t''_q$	0,003 – 0,052 s	0,017 s	0,021 s	1,3 %
H [Ws/Va]	0,08 – 3,93	0,58	0,78	65,7 %

### 3.3.2 Ulike parameteres påvirkning på generatorers transiente stabilitet

Stabiliteten påvirkes blant annet av parametrene beskrevet på forrige side, nettsituasjon og spenningsregulering. Noen slike parametre er listet opp i tabellen under. Tabellen er hentet fra [19], hvor kildene for hver påstand er lagt ved. Noen av disse påstandene vil bli testet i FRT-studien.

TABELL 3.2 ULIKE PARAMETERES PÅVIRKNING PÅ GENERATORENS TRANSIENTE STABILITET. [19]

	PARAMETER	PÅVIRKNING PÅ GENERATORENS TRANSIENTE STABILITET	PÅVIRKNINGSKRAFT
Generator	Tregheitskonstanten $H$	Stor svingmasse er positivt	Stor
	Synkronreaktans $x_d$	Lav synkronreaktans er positivt – gir lav polhjulsvinkel før feil	Medium
	Synkronreaktans $x_q$	Lav synkronreaktans er positivt	Liten
	Transient reaktans $x'_d$	Lav transient reaktans er positivt – gir høy transient effekt	Stor
	Subtransient reaktans $x''_d$ og $x''_q$	Lave subtransiente reaktanser er positivt og $x''_d = x''_q$ (godt dempet generator)	Liten
	Aktiv effektproduksjon før feil - P	Lav produksjon av aktiv effekt er positivt.	Stor
	Aktiv effektproduksjon før feil - Q	Høy produksjon positivt. Høyt forbruk svært negativt	Stor
	Spenning før feil	Høy spenning er positivt	Medium
	Spenning under feil	Høy spenning er positivt	Stor
	Spenning etter feil	Høy spenning er positivt	Medium
AVR	Spenningsregulator (AVR)	Aktiv spenningsregulator er positivt sett i forhold til ingen spenningsregulator	Stor
	Tidskonstant for magnetisering, $T_e$	Lav tidskonstant er positivt	Liten (større ved økt feilvarighet)
	Takspenning – VRMAX /VEMAX	Høy takspenning er positivt	Liten (så lenge den er over en viss grense)
	VAR/PF-kontroller	Aktiv VAR/PF-kontroller er negativt	Liten/Medium
	Endring i spenningsens fasevinkel under feil	-	(Medium)
Nettverk og feil	Avstand til feil	Stor avstand positivt – gir høyere spenning under feil	Stor
	Avstand til nettstasjon	Liten avstand positivt – gir mindre $x_s$	Liten
	Feilklareringstid	Liten feilklareringstid er positivt – gir mindre tid til akselerering av rotor	Stor
	Feiltype	Tofase feil vesentlig bedre enn trefase – gir høyere spenning under feil	Stor
	X/R-forhold for feil	Lavt X/R-forhold er positivt – høy resistans betyr at generatoren kan levere mer aktiv effekt under feil	(Medium)
	Last i systemet	Lav last er positivt (men er veldig avhengig av lasttype)	(Liten)
	Systemimpedans etter feil	Lav impedans er positivt – Høy impedans kan for eksempel være utfall av linje.	Medium

# 4 TEST AV FRT EGENSKAPER TIL TYPISKE SMÅKRAFTVERK

I dette kapittelet vil den transiente stabiliteten til noen av generatorene fra datainnsamlingen [18] bli studert. Dette vil legge grunnlaget for Voss-studien ved å bestemme hvilken feil som skal brukes som dimensjonerende, i tillegg til å forsvare forutsetninger som settes.

Først vil det gjennomføres en undersøkelse av FRT egenskapene til 20 av generatorene fra datainnsamlingen. Her varieres restspenning og varighet på feil. Datainnsamlingen inneholder generatorer fra tidligere studier gjort av Siemens PTI. Noen datablad er fra nye generatorer som er dimensjonert etter krav i studiene. Andre er generatorer som eksisterte før studiene ble gjort. Derfor vil det være varierende kvalitet på dem dynamisk.

Videre vil et utvalg av generatorene bli brukt til å teste noen av parametrene fra Tabell 3.2, for å se hvilken påvirkning de har på den transiente stabiliteten. Simuleringene blir gjort i simuleringsverktøy og ikke på lab. Studien begrenses derfor til å se påvirkningen de ulike parametrene har i teoretiske analyser.

Til slutt vil det bli diskutert viktigheten av å oppgi riktig informasjon ved bestilling av slike analyser. Det blir også diskutert viktigheten av konservative analyser, og foreslåtte forutsetninger som kan oppnå dette.

## 4.1 Generatorer og modellering

Det er valgt å studere 20 av generatorene fra datainnsamlingen [18]. Generatordataene er presentert i tabellene under.

**TABELL 4.1 GENERATORDATA TIL G01-G10.**

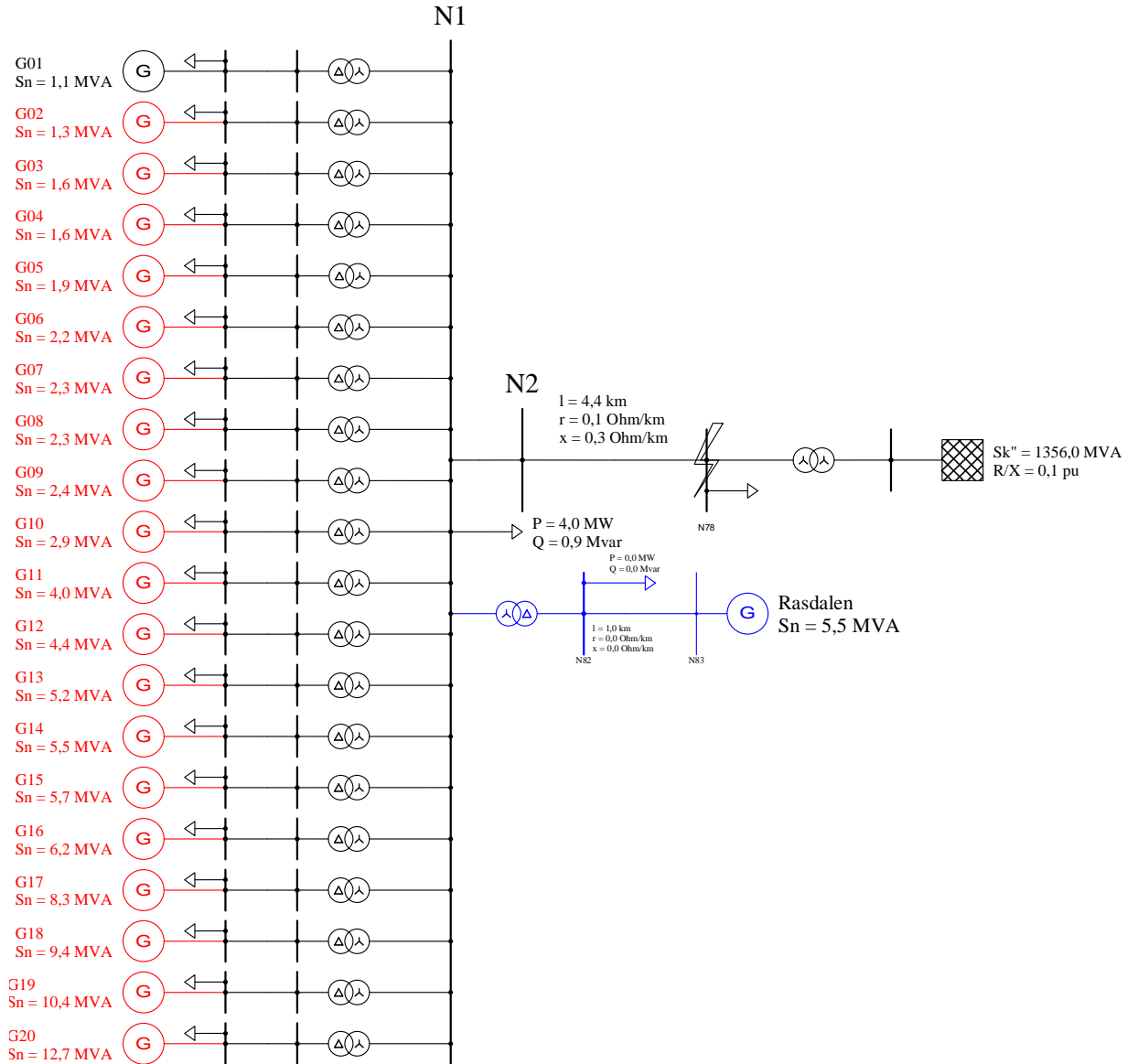
		G01	G02	G03	G04	G05	G06	G07	G08	G09	G10
$S_N$	[MVA]	1,15	1,3	1,6	1,65	1,9	2,23	2,3	2,33	2,37	2,85
$U_N$	[kV]	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
$n$	[rpm]	750	333,3	750	1000	750	750	750	750	1000	600
$x_d$	[pu]	1,16	1,41	2,20	0,98	3,13	3,73	1,08	1,39	3,27	1,46
$x'_d$	[pu]	0,19	0,23	0,24	0,17	0,29	0,34	0,21	0,24	0,35	0,28
$x''_d$	[pu]	0,15	0,19	0,11	0,13	0,11	0,13	0,12	0,15	0,13	0,17
$x_q$	[pu]	1,04	1,27	0,92	0,88	1,35	1,61	0,58	0,75	1,40	0,78
$x'_q$	[pu]	1,04	1,27	0,92	0,88	1,35	1,61	0,58	0,75	1,40	0,78
$x''_q$	[pu]	0,35	0,44	0,11	0,34	0,11	0,13	0,14	0,16	0,14	0,19
$t'_d$	[s]	0,23	0,27	0,39	0,37	0,45	0,52	0,43	0,44	0,47	0,44
$t''_d$	[s]	0,03	0,05	0,01	0,06	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
$t''_q$	[s]	0,012	0,022	0,008	0,037	0,01	0,009	0,04	0,04	1,017	0,04
$J$	[kgm <sup>2</sup> ]	214	905	211	362	242	242	1175	375	175	550
$H$	[Ws/Va]	0,57	0,47	0,41	1,20	0,39	0,33	1,58	0,50	0,40	0,38

**TABELL 4.2 GENERATORDATA TIL G11-G20.**

		G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18	G19	G20
$S_N$	[MVA]	3,96	4,4	5,15	5,45	5,65	6,15	8,25	9,4	10,38	12,7
$U_N$	[kV]	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
$n$	[rpm]	600	750	750	750	1000	750	750	750	1000	600
$x_d$	[pu]	1,30	1,46	1,20	1,29	1,80	1,12	1,76	2,42	1,96	1,46
$x'_d$	[pu]	0,22	0,27	0,27	0,29	0,28	0,26	0,22	0,31	0,25	0,22
$x''_d$	[pu]	0,13	0,18	0,16	0,18	0,20	0,17	0,14	0,20	0,17	0,14
$x_q$	[pu]	0,78	1,31	0,65	0,70	0,98	0,60	0,97	1,39	1,14	0,92
$x'_q$	[pu]	0,78	1,31	0,65	0,70	0,98	0,60	0,97	1,39	1,14	0,92
$x''_q$	[pu]	0,16	0,50	0,18	0,19	0,30	0,19	0,13	0,20	0,15	0,14
$t'_d$	[s]	0,34	0,46	0,52	0,51	0,53	0,56	0,62	0,76	0,95	0,84
$t''_d$	[s]	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,08	0,01
$t''_q$	[s]	0,016	0,026	0,05	0,052	0,05	0,05	0,023	0,038	0,024	0,024
$J$	[kgm <sup>2</sup> ]	794	1030	1300	1300	4050	1950	3349	2246	1850	7500
$H$	[Ws/Va]	0,40	0,72	0,78	0,74	3,93	0,98	1,25	0,74	0,98	1,17

## Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk

Generatorene er koblet til et tobussystem hvor det er brukt samme linjedata, nettekivalent og last som i Voss-studien. Lasten er modellert som lavlast (21,11 % av P og 21,15 % av Q). Alle generatorer er innstilt med AVR som er tunet etter best mulig respons i henhold til Statnett sitt krav, punkt 3 i kapittel 2.2.4. Modellen i sin helhet er vist i figuren under. Feilen dimensjoneres slik at ønsket spenningsfallet vil ligge på N2. Linje mellom N1 og N2 er en nulltapslinje og har ingen annen funksjon enn å se strømmen gjennom den.



FIGUR 4.1 SIMULERINGSMODEL I FRT-STUDIEN.



#### 4.1.1 Verifisering av modell med Rasdalen kraftstasjon

For å se om modellen er modellert riktig, er en generator fra Voss-studien lagt inn. Denne generatoren har i virkeligheten hatt episoder med utkobling og antas å ha noe svake dynamiske egenskaper.<sup>5</sup> Det er derfor utført en test for å verifisere modellen med noe sammenlignbart.

TABELL 4.3 RESULTATER FRA SIMULERINGER AV RASDALEN KRAFTSTASJON I TO BUSS SYSTEM-MODELLEN.

		Varighet [ms]	Restspenning				
			80 %	30 %	25 %	20 %	15 %
Full produksjon	cos $\varphi$ = 0,9 (kapasitiv)	100	OK	OK	OK	OK	OK
		150	OK	OK	OK	OK	Ustabil
		200	OK	OK	Ustabil	Ustabil	Ustabil
		250	OK	OK	Ustabil	Ustabil	Ustabil
		300	OK	Ustabil	Ustabil	Ustabil	Ustabil
	cos $\varphi$ = -0,95 (induktiv)	100	OK	OK	OK	OK	OK
		150	OK	Ustabil	Ustabil	Ustabil	Ustabil
		200	OK	Ustabil	Ustabil	Ustabil	Ustabil
		250	OK	Ustabil	Ustabil	Ustabil	Ustabil
		300	OK	Ustabil	Ustabil	Ustabil	Ustabil

Resultatene viser at generatoren ikke holder lenge med ved restspenning i feilstedet på under 30 %. I nettet i Voss-studien er det mye produksjon i forhold til last. Dette fører mest sannsynlig til høy spenningen og derfor undermagnetisering av generatoren (generator trekker reaktiv effekt). Slik vil mest trolig den delen av studien med induktiv drift være situasjonen i virkeligheten. Resultatet bekrefter antagelsen om at generatoren har noe svake dynamiske egenskaper.

<sup>5</sup> John Magne Herre informerte om at det har vært flere episoder med utkobling i denne kraftstasjonen.

## 4.2 Undersøkelse av FRT egenskapene til småkraftgeneratorer

Når det skal dokumenteres om et småkraftverk har evne til å være transient stabil eller ikke, må maksimal feilklareringstid og minimum linjespenning under feilen bli oppgitt av nettselskapet. [3] Hvis dette ikke blir oppgitt må dette antas. For å anta dette er det simulert feilsituasjoner med varierende restspenning og klareringstid. Hver simulering er gjort med én generator koblet inn.

I den første simuleringen er generatorene innstilt med spenningsregulering. Det kom frem av lastflytberegning at alle generatorene ligger med full overmagnetisering. Dette produserer en reaktiv effekt tilsvarende  $\cos \varphi = 0,9$ , som er satt som grense på spenningsregulatorene. Den andre simuleringen har generatoren innstilt med  $\cos \varphi$ -regulering med innstilling  $\cos \varphi = -0,95$  (undermagnetisert). Dette er i henhold til generatorens effektfaktorband foreslått av REN, se punkt 6 i kapittel 2.2.4.

Resultatene er vist i Tabell 4.4 ( $\cos \varphi = 0,9$ ) og Tabell 4.5 ( $\cos \varphi = -0,95$ ). Responsen er merket i følgende fargekoder:

- **Grønn** er ok. Generatorene svinger seg inn til stasjonær driftspunkt.
- Verninnstilling er antatt til å være i henhold til krav fra SINTEF, punkt 4 i kapittel 2.2.4:
  - o **Gul** beskriver overspenning:  $U > 1,1$  pu ved  $t = 1,5$  s
  - o **Beige** beskriver underspenning:  $U < 0,85$  pu ved  $t = 1,5$  s
- **Rød** betyr ustabilitet. Generatorene klarer ikke å svinge seg inn til stasjonær driftspunkt.

## Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk

**TABELL 4.4 RESULTAT AV FRT-UNDERSØKELSEN. GENERATORENE ER INNSTILT MED KAPASITIV DRIFT.**

	Varighet [ms]	Restspenning																			
		30 %					25 %					20 %					15 %				
Full produksjon $\cos \varphi = 0,9$ (overmagnetisert)	100	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05
		G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10
		G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15
		G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20
	150	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05
		G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10
		G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15
		G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20
	200	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05
		G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10
		G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15
		G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20
	250	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05
		G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10
		G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15
		G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20
	300	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05
		G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10
		G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15
		G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20

<U
>>U
Ustabil

**TABELL 4.5 RESULTAT AV FRT-UNDERSØKELSEN. GENERATORENE ER INNSTILT MED INDUKTIV DRIFT.**

	Varighet [ms]	Restspenning																			
		30 %					25 %					20 %					15 %				
Full produksjon $\cos \varphi = -0,95$ (undermagnetisert)	100	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05
		G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10
		G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15
		G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20
	150	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05
		G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10
		G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15
		G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20
	200	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05
		G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10
		G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15
		G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20
	250	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05
		G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10
		G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15
		G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20
	300	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05	G01	G02	G03	G04	G05
		G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10	G06	G07	G08	G09	G10
		G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15	G11	G12	G13	G14	G15
		G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20	G16	G17	G18	G19	G20

<U
>>U
Ustabil

## Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk

Undersøkelsen viser at mange av generatorene har gode dynamiske egenskaper. Som tidligere nevnt kan dette være generatorer som er bestilt ut fra krav satt av Siemens PTI.

På grunn av mange gode generatorer vil undersøkelsen ikke nødvendigvis gir et sant bilde på hva typiske småkraftverk tåler i slike analyser. Likevel viser resultatene fra Rasdalen at modellen ikke gir for gode resultater for alle maskiner. De generatorene som blir ustabile viser at krav til effektfaktorbånd satt av REN er fornuftig, hvor dette gir et bånd mellom hva som er for snilt og strengt.

Videre vil et utvalg av generatorene bli brukt ved for å kartlegge hvilken påvirkning nettsituasjon, spenningsregulator og generatorparametre har på generatorens transiente stabilitet. Dette gjøres for å kartlegge usikkerhet i slike analyser, hvor å utføre korrekte dynamiske simuleringer av transient stabilitet er krevende. Dette vil videre bli brukt ved vurdering av resultatene fra Voss-studien.

### 4.3 Studie av ulike parametres påvirkning på generatorenes stabilitet

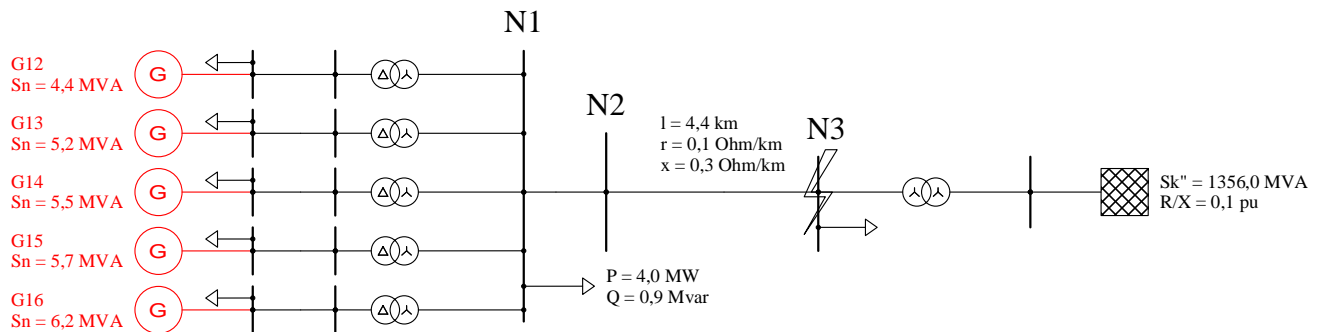
Med utgangspunkt i Tabell 3.2 er det valgt å se på utvalg av påvirkningsparametre. Det er også valgt å se på hvordan påvirkning kortslutningsytelsen fra ytre nett har. I tillegg er det valgt å se på påvirkningen av generatorsvigninger fra flere generatorene i nettet.

TABELL 4.6 PARAMETRE SOM SKAL STUDERES.

	PARAMETER	POSITIV PÅVIRKNING	PÅVIRKNINGSKRAFT (TEORI)
Generator	Svingmasse J/H	Høy	Stor
	$x_d$	Lav	Medium
	$x_q$	Lav	Liten
	$x'_d$	Lav	Stor
	$x''_d$ og $x''_q$	Lav	Liten
	$t'_d$	Høy	Medium
	$t''_d$	Høy	Liten
	$t''_q$	Høy	Liten
	AVR	Aktiv	Stor
	Tuning av AVR	Godt tunet	Liten
Nettverk	Effektproduksjon før feil - P	Lav	Stor
	Effektproduksjon før feil - Q	Høy	Medium
	Generatorsvigninger	Motfase	Liten
	Last i systemet	Lav	Liten
	Nettets kortslutningsytelse	Høy	Stor

#### 4.3.1 Modell

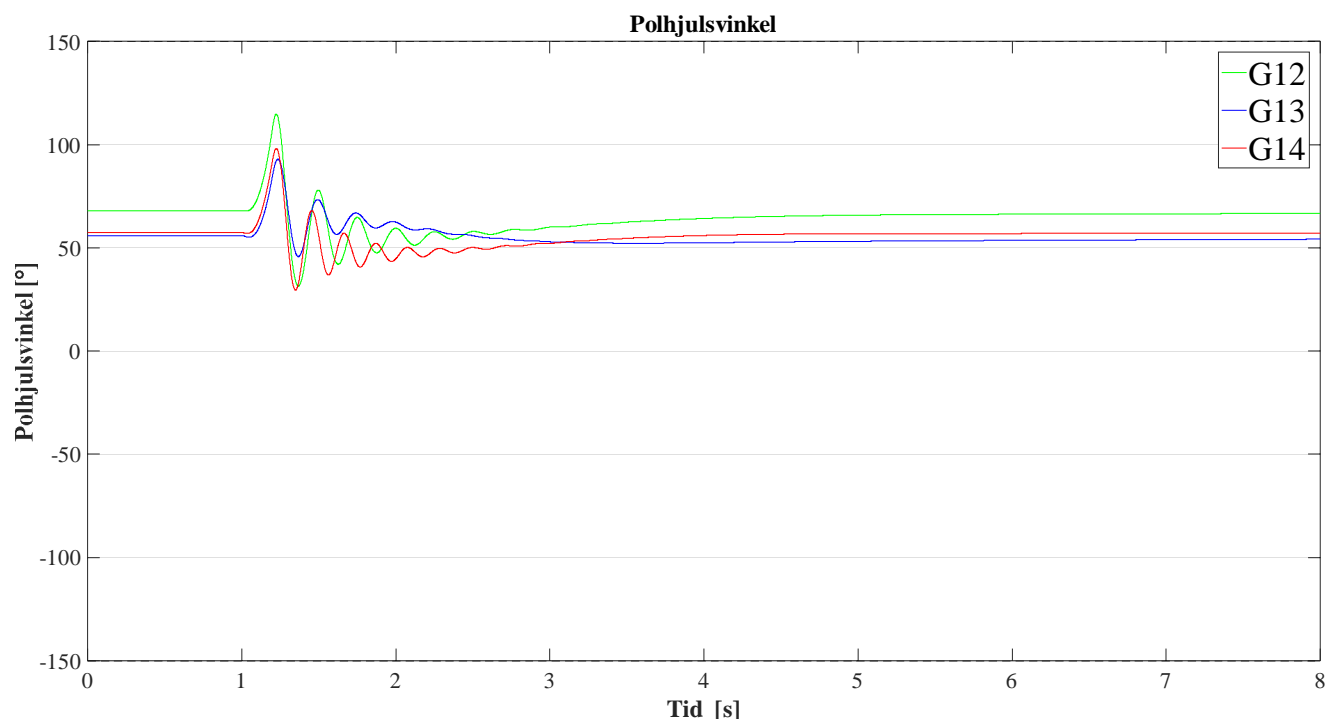
G12, G13 og G14 er valgt ut til simuleringene. G15 og G16 vil brukes når generatorsvigninger skal studeres. Feil lagt inn har 20 % restspenning med varighet 200 ms. Generatorene er modellert med spenningsregulering, noe som i følge lastflytberegninger tilsvarer kapasitiv drift,  $\cos \phi = 0,9$ .



FIGUR 4.2 SIMULERINGSMODELL VED STUDIE AV ULIKE PARAMETRES PÅVIRKNING PÅ GENERATORENES TRANSIENTE STABILITET.

Generatorenes svingrespons er vist i Figur 4.3. Simuleringene er gjort separat, men presenteres i samme diagram.

# Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk



FIGUR 4.3 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 ETTER FEIL MED 20 % RESTSPENNING VARIGHET 200 MS.

### 4.3.2 Svingmasse

I disse simuleringene blir treghetsmomentet økt med  $500 \text{ kgm}^2$ .

TABELL 4.7 ØKING AV TREGHETSMOMENT PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14. J ER I  $[\text{KGM}^2]$ . H ER I  $[\text{WS/VA}]$ .

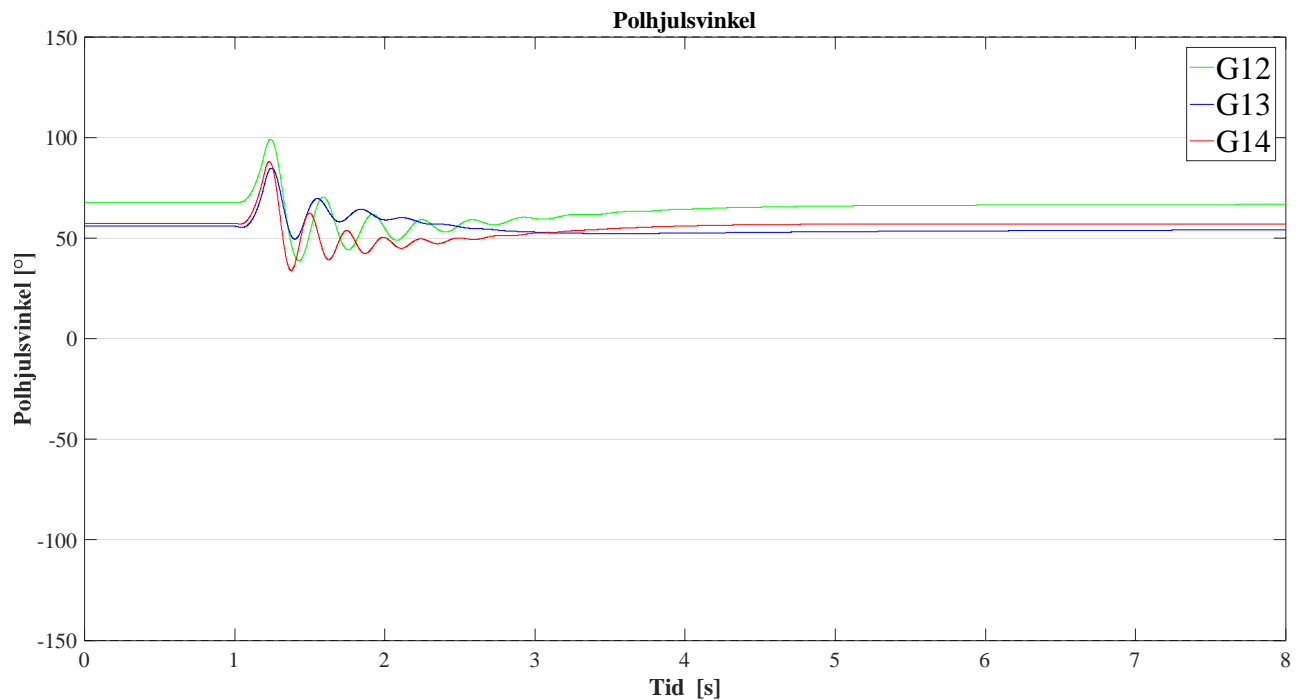
	G12		G13		G14	
	J	H	J	H	J	H
Utgangspunkt	1030	0,72	1300	0,78	1300	0,74
Økt treghetsmoment	1530	1,07	1800	1,08	1800	1,02

Maksimalt utsving er notert både før og etter økningen i treghetsmoment:

TABELL 4.8 RESULTAT FRA SIMULERING MED OG UTEN ØKT SVINGMASSE PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

	G12	G13	G14
Utgangspunkt	$110,7^\circ$	$92,9^\circ$	$98^\circ$
Økt treghetsmoment	$99,2^\circ$	$84,8^\circ$	$88,1^\circ$

Generatorenes svingrespons med økt treghet er vist i figuren under. Simuleringene er gjort separat, men presenteres i samme diagram.



FIGUR 4.4 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 MED ØKT SVINGMASSE.

Resultatene viser at treghetsmomentet har **stor** påvirkning på generatorens transiente stabilitet.

### 4.3.3 Synkronreaktans $x_d$

I disse simuleringene er synkronreaktansene i d-aksen redusert med 20 %:

TABELL 4.9 REDUSERING AV  $x_d$  PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

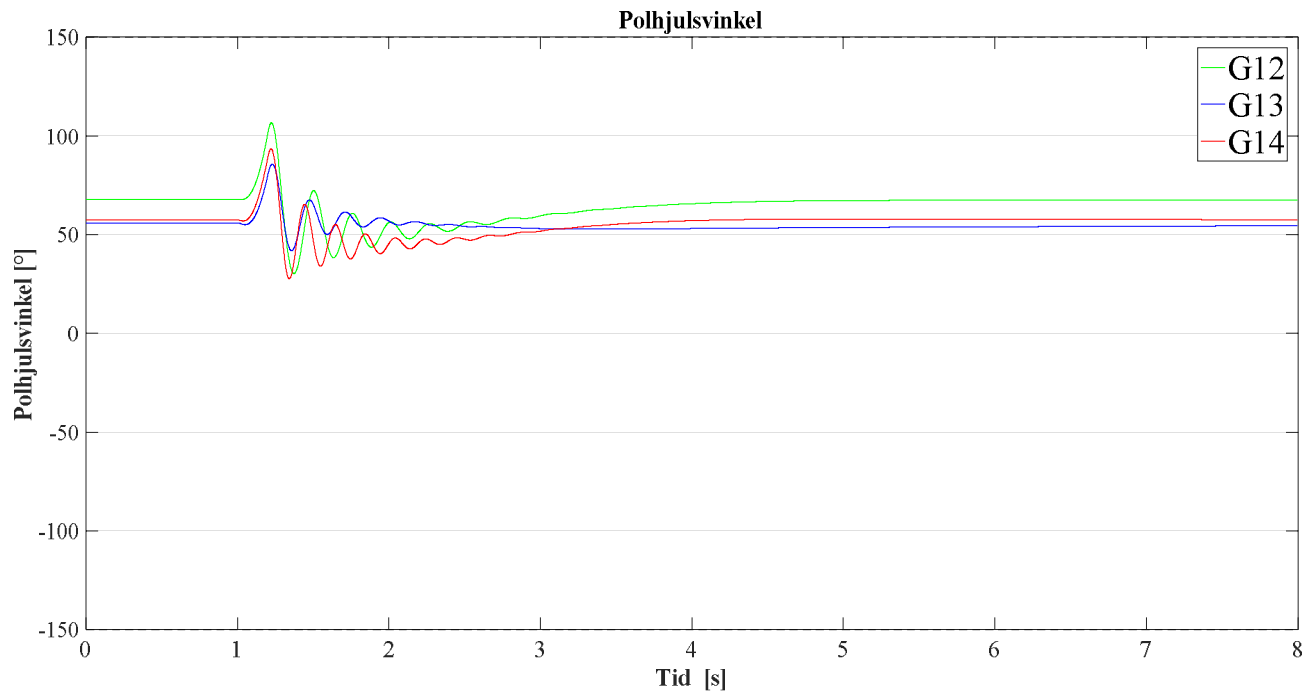
	G12	G13	G14
Utgangspunkt	1,46 pu	1,2 pu	1,29 pu
Redusert $x_d$	1,17 pu	0,96 pu	1,03 pu

Maksimalt utsving er notert både før og etter senkingen av synkronreaktansene.

TABELL 4.10 RESULTAT FRA SIMULERING MED OG UTEN SENKING I  $x_d$  PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

	G12	G13	G14
Utgangspunkt	110,7°	92,9°	98°
Redusert $x_d$	106,5 °	85,7 °	93,3 °

Generatorenes svingrespons med senket  $x_d$  er vist i figuren under. Simuleringen er gjort separat, men presenteres i samme diagram.



FIGUR 4.5 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 MED REDUSERT  $x_d$ .

Resultatene viser at synkronreaktansene i d-aksen har **noe** påvirkning på generatorens transiente stabilitet.



## Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk

### 4.3.4 Synkronreaktans $x_q = x'_q$

I disse simuleringene er synkronreaktansen og transient reaktans i q-aksen redusert med 20 %:

TABELL 4.11 REDUSERING  $x_q$  OG  $x'_q$  PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

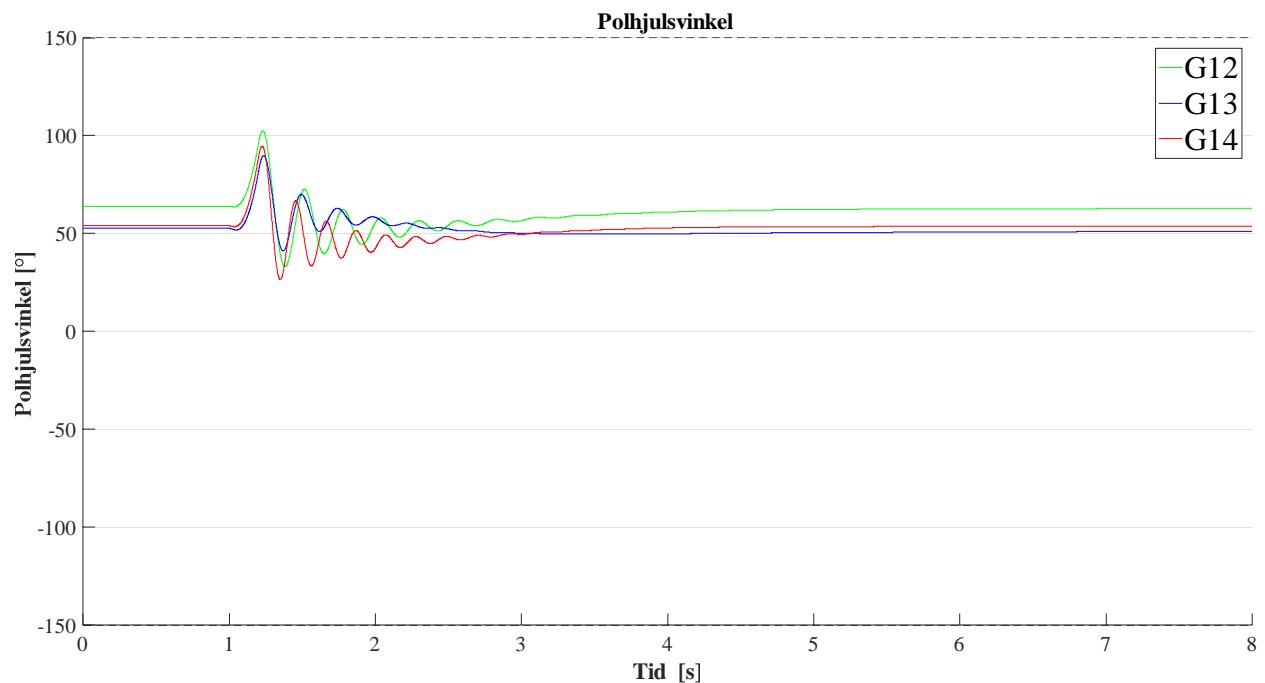
	G12	G13	G14
Utgangspunkt	1,31 pu	0,65 pu	0,7 pu
Redusert $x_q = x'_q$	1,05 pu	0,52 pu	0,56 pu

Maksimalt utsving er notert både før og etter senkingen av reaktansene.

TABELL 4.12 RESULTAT FRA SIMULERING MED OG UTEN SENKING I  $x_q$  OG  $x'_q$  PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

	G12	G13	G14
Utgangspunkt	110,7°	92,9°	98°
Redusert $x_q = x'_q$	102,5°	89,8°	94,7°

Generatorenes svingrespons med senket  $x_q$  og  $x'_q$  er vist i figuren under. Simuleringen er gjort separat, men presenteres i samme diagram.



FIGUR 4.6 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 MED ØKT  $x_q$  OG  $x'_q$ .

Resultatene viser at synkronreaktansen og transient reaktans i q-aksen har **noe** påvirkning på generatorens transiente stabilitet.

### 4.3.5 Transient reaktanser $x'_d$

I disse simuleringene er de transiente reaktansene i d-aksen redusert med 20 %:

TABELL 4.13 REDUSERING  $x'_d$  PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

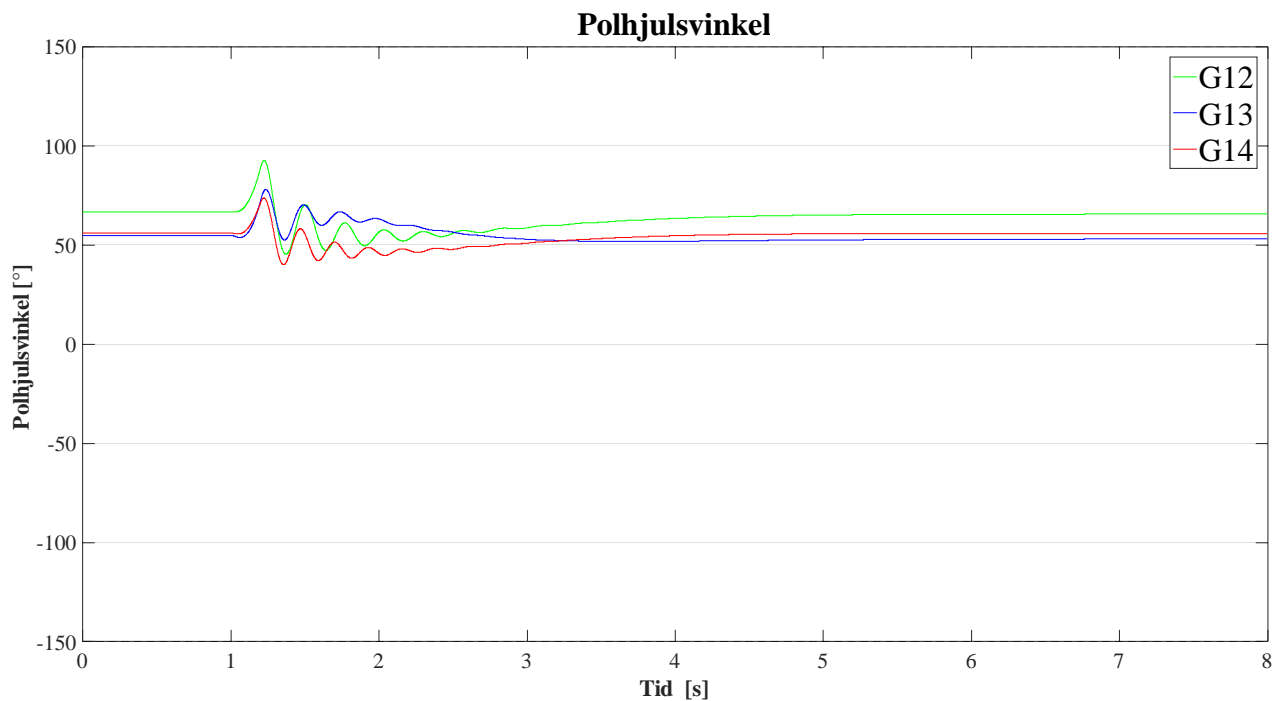
	G12	G13	G14
Utgangspunkt	0,27 pu	0,27 pu	0,29 pu
Redusert $x'_d$	0,21 pu	0,22 pu	0,23 pu

Maksimalt utsving er notert både før og etter senkingen av reaktansene.

TABELL 4.14 RESULTAT FRA SIMULERING MED OG UTEN SENKING  $x'_d$  PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

	G12	G13	G14
Utgangspunkt	110,7°	92,9°	98°
Redusert $x'_d$	92,6°	78°	73,7°

Generatorenes svingrespons med senket  $x'_d$  er vist i figuren under. Simuleringen er gjort separat, men presenteres i samme diagram.



FIGUR 4.7 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 MED REDUSERT  $x'_d$ .

Resultatene viser at den transiente reaktansen i d-aksen har **stor** påvirkning på generatorens transiente stabilitet.

#### 4.3.6 Subtransient reaktanser $x''_d$ og $x''_q$

I disse simuleringene er synkronreaktansene i q-aksen redusert med 20 %:

TABELL 4.15 REDUSERING I  $x''_d$  OG  $x''_q$  PÅ GENERATORENE G12, G13 OG G14.

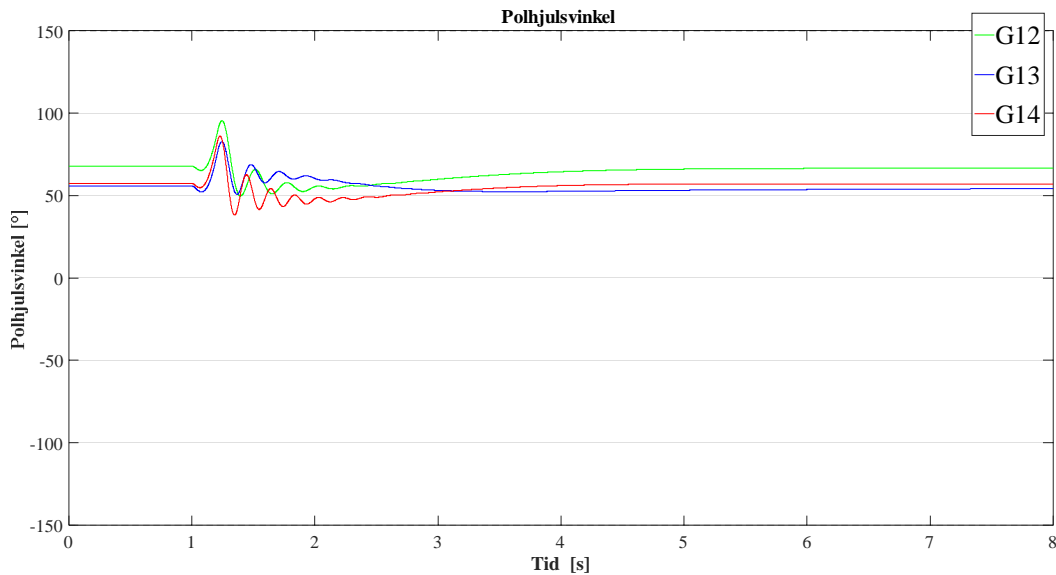
	G12	G13	G14
Utgangspunkt $x''_d$	0,18 pu	0,16 pu	0,18 pu
Redusert $x''_d$	0,14 pu	0,13 pu	0,14 pu
Utgangspunkt $x''_q$	0,5 pu	0,18 pu	0,19 pu
Redusert $x''_q$	0,4 pu	0,14 pu	0,15 pu

Maksimalt utsving er notert både før og etter senkingen av reaktansene.

TABELL 4.16 RESULTAT FRA SIMULERING MED OG UTEN SENKING I  $x''_d$  OG  $x''_q$  PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

	G12	G13	G14
Utgangspunkt	110,7°	92,9°	98°
Redusert $x''_d$ og $x''_q$	95,4	82,7	86

Generatorenes svingrespons med senket  $x''_d$  og  $x''_q$  er vist i figuren under. Simuleringen er gjort separat, men presenteres i samme diagram.



FIGUR 4.8 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 MED REDUSERT  $x''_d$  OG  $x''_q$ .

Resultatene viser at de subtransiente reaktansene har **stor** påvirkning på generatorens transiente stabilitet.

### 4.3.7 AVR

I disse simuleringene kjøres generatorene uten spenningsregulator:

**TABELL 4.17 SIMULERINGER UTFØRT MED OG UTEN SPENNINGREGULATOR PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.**

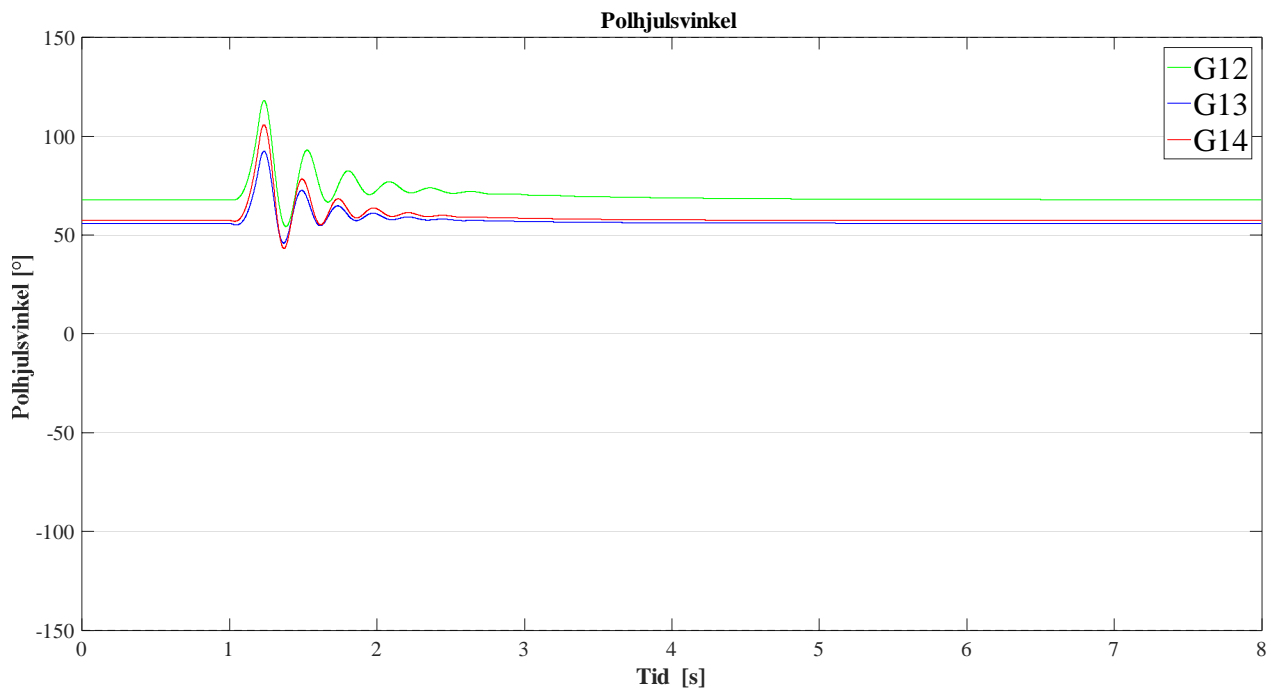
	G12	G13	G14
Med AVR	Aktiv	Aktiv	Aktiv
Uten AVR	Deaktivert	Deaktivert	Deaktivert

Maksimalt utsving er notert både før og etter utkobling av spenningsregulatorene.

**TABELL 4.18 RESULTAT FRA SIMULERING UTEN SPENNINGREGULATOR PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.**

	G12	G13	G14
Med AVR	110,7°	92,9°	98°
Uten AVR	118°	92,4°	105,7°

Generatorenes svingrespons uten AVR er vist i figuren under. Simuleringen er gjort separat, men presenteres i samme diagram.



**FIGUR 4.9 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 UTEN SPENNINGREGULERING.**

Resultatene viser noe påvirkning på G12. G14 har litt påvirkning og G13 har nesten ingen påvirkning.

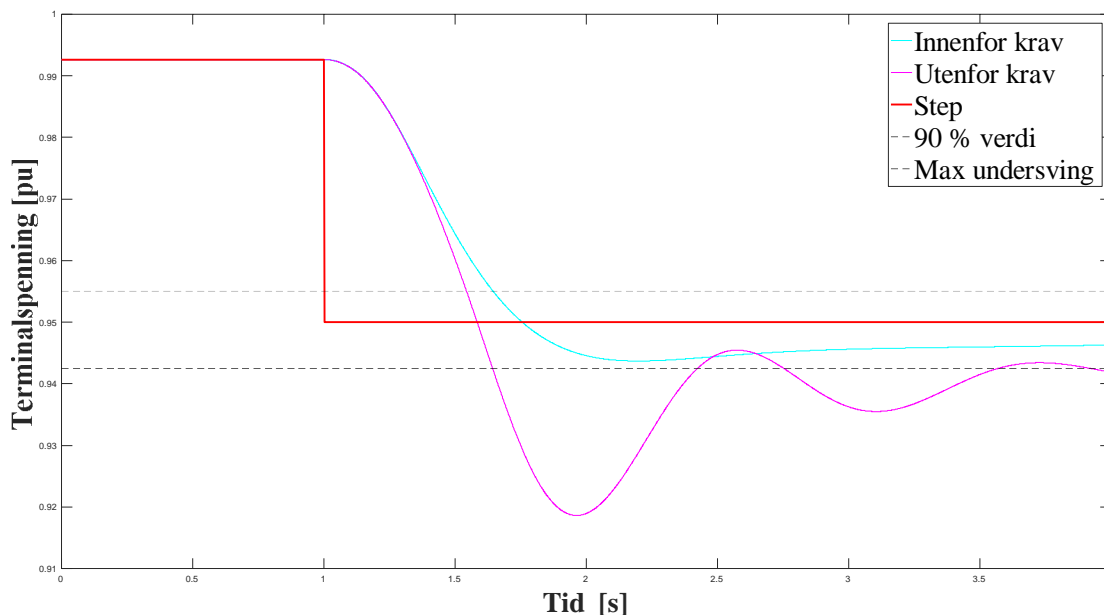
### 4.3.8 Dårlig tunet AVR

Det er kun valgt å se G12 i denne simuleringen da denne generatoren blir mest påvirket av deaktiveringen av spenningsregulatoren. I slike dynamiske analyser kan det være tidkrevende å fintune spenningsregulatorer. Spesielt hvis det er mange i samme modell. Derfor blir det sett på hvordan en dårlig tunet spenningsregulator påvirker resultatene. I den dårlig tunet spenningsregulatoren er proporsjonal- og integrasjonsleddet økt betydelig.

TABELL 4.19 SIMULERINGER UTFØRT MED OG UTEN AVR TUNET INNEN OG UTENFOR KRAV PÅ GENERATOR G12.

G12	
Utgangspunkt	Innenfor krav
Dårlig tunet	Utenfor krav

Terminalspenning G15 etter AVR er godt og dårlig tunet er vist i figuren under. Simuleringen er gjort separat men presenteres i samme diagram.



FIGUR 4.10 GODT OG DÅRLIG TUNET AVR.

Maksimalt utsving er notert både før og etter utkobling av spenningsregulatorene.

TABELL 4.20 RESULTAT FRA SIMULERING MED GODT OG DÅRLIG TUNET AVR PÅ GENERATOR G12

G12	
Utgangspunkt	110,7°
Dårlig tunet	110,4°

Resultatene viser at hvor godt spenningsregulatoren er tunet har tilnærmet ingen påvirkning på G12.

### 4.3.9 Effektproduksjon før feil - P

I disse simuleringene kjøres generatorene med halvert produksjon av aktiv effekt:

TABELL 4.21 REDUSERING I PRODUKSJON AV AKTIV EFFEKT PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

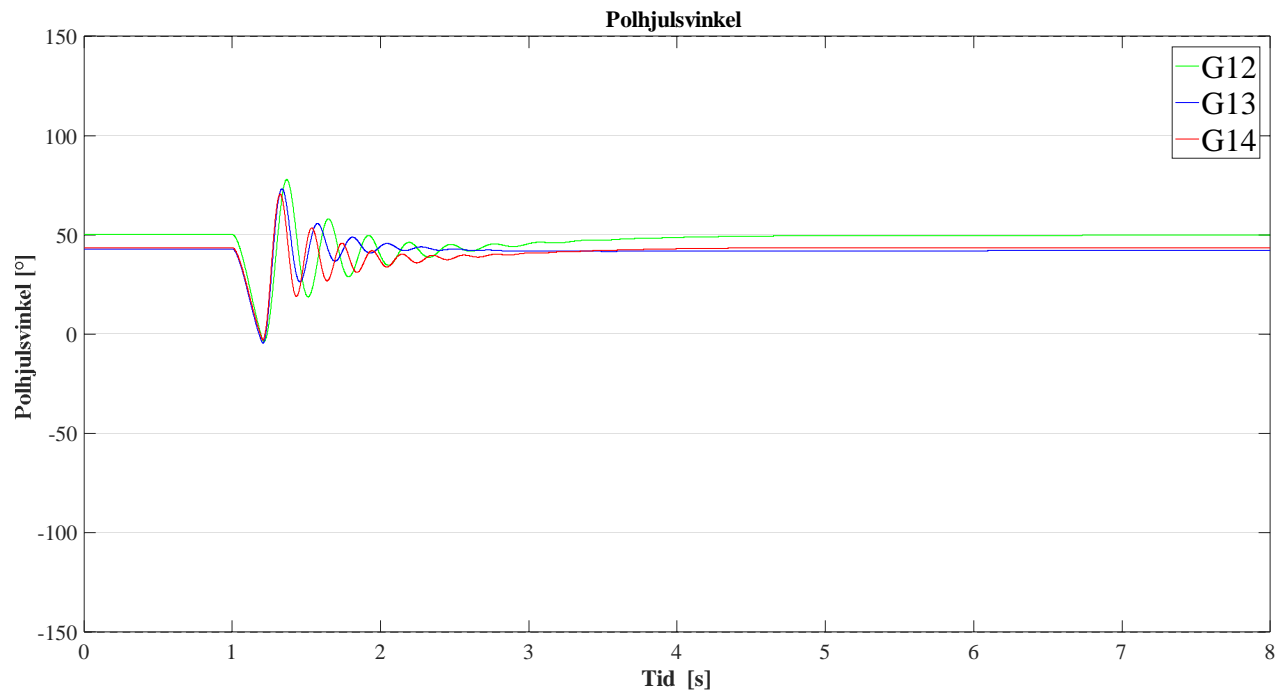
	G12	G13	G14
Utgangspunkt	4,18 MW	4,89 MW	5,18 MW
Halvert P	2,09 MW	2,445 MW	2,59 MW

Maksimalt utsving er notert både med full og halv produksjon av aktiv effekt.

TABELL 4.22 RESULTAT FRA SIMULERING MED HALV OG FULL PRODUKSJON AV AKTIV EFFEKT PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

	G12	G13	G14
Utgangspunkt	110,7°	92,9°	98°
Halvert P	77,8 °	73,2 °	70,4 °

Generatorenes svingrespons med halv produksjon av aktiv effekt er vist i figuren under. Simuleringen er gjort separat, men presenteres i samme diagram.



FIGUR 4.11 SVINGERESPONS TIL GENERATORER G12, G13 OG G14 VED HALV PRODUKSJON AV AKTIV EFFEKT.

Resultatene viser at produksjonen av aktiv effekt har **stor** påvirkning på generatorenes transiente stabilitet.

#### 4.3.10 Effektproduksjon før feil – Q

I disse simuleringene kjøres generatorene med reaktiv effekt produksjon tilsvarende effektfaktor -0,95 og 0,9:

TABELL 4.23 FORBRUK AV REAKTIV EFFEKT PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

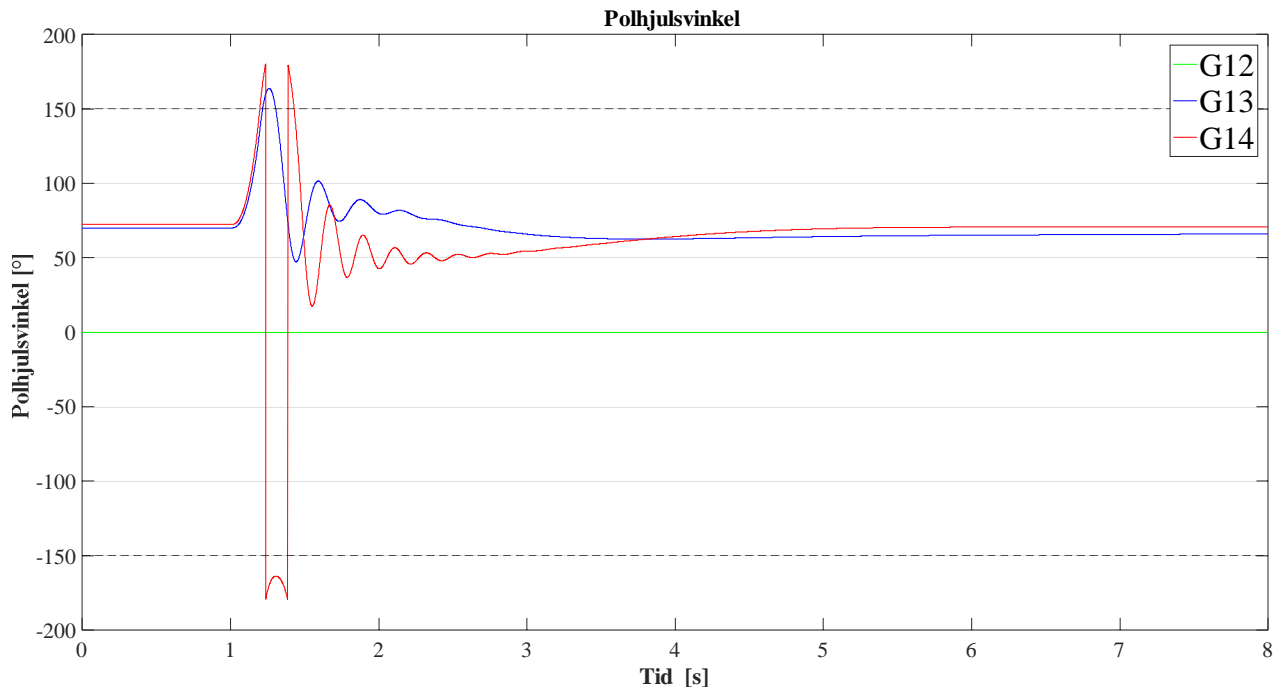
	G12	G13	G14
Utgangspunkt	1,92 MVar	2,24 MVar	2,38 MVar
Induktiv drift	-1,37 MVar	-1,61 MVar	-1,7 MVar

Maksimalt utsving er notert både med induktiv og kapasitiv produksjon av reaktiv effekt.

TABELL 4.24 RESULTAT FRA SIMULERING MED REAKTIV EFFEKT PRODUKSJON, TILSVARENDE  $\cos \phi = 0,9$  OG  $-0,95$ , PÅ GENERATOR G12, G13 OG G14.

	G12	G13	G14
Utgangspunkt	110,7°	92,9°	98°
Induktiv drift	Polslipp	163,82	179,95 °

Generatorenes svingerespons med forbruk av reaktiv effekt, tilsvarende  $\cos \phi = -0,95$  er vist i figuren under. Simuleringen er gjort separat, men presenteres i samme diagram.



FIGUR 4.12 SVINGERESPONS TIL GENERATORERENE VED REAKTIV EFFEKT PRODUKSJON TILSVARENDE  $\cos \phi = -0,95$ .

Alle generatorene når høye polhjulsvinkler. G12 kunne ikke simuleres pga konvergensproblemer fordi generatoren ble ustabil. Feilklareingstiden til G12 er beregnet til å være litt i underkant av 150 ms. Resultatet viser at endring mellom kapasitiv og induktiv drift har **stor** påvirkning i generatorenes transiente stabilitet.

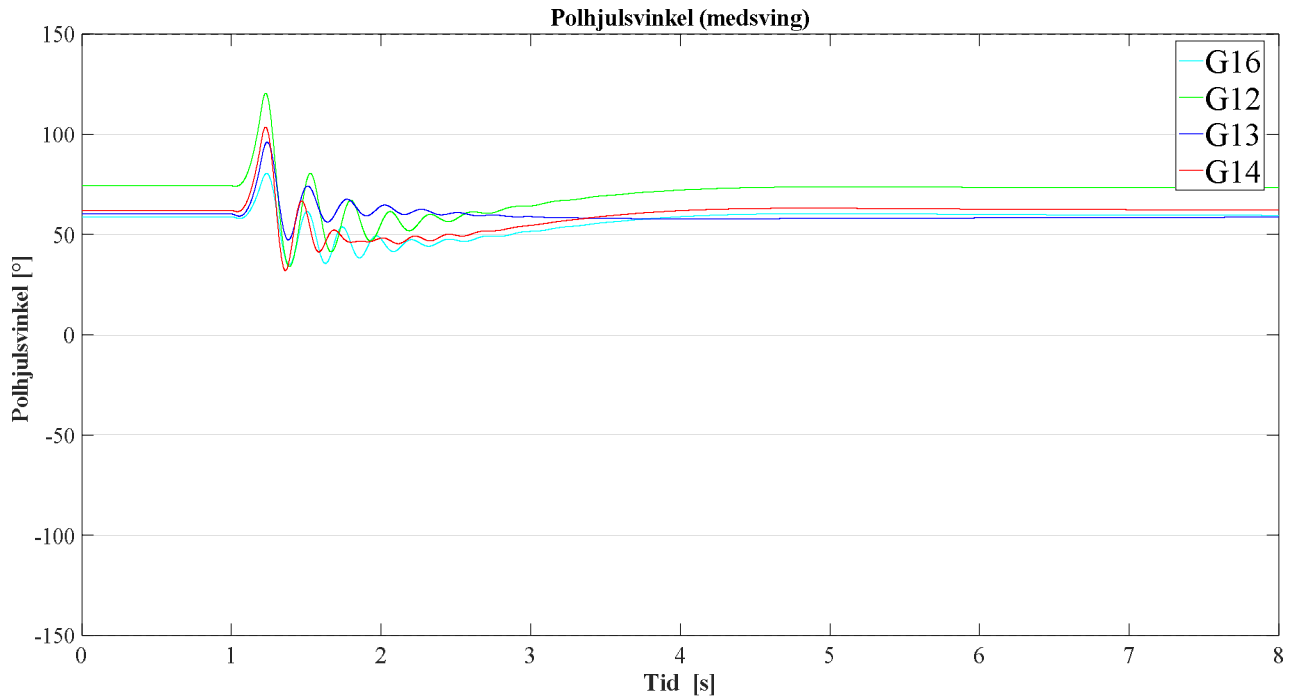
### 4.3.11 Generatorsvingninger

I disse simuleringene skal generatorene bli påvirket av en parallellkobling med en annen generator som svinger i fase og en som svinger i motfase. I modellen er det lagt inn to generatorer, G15 og G16 som svinger forskjellig. Den ene svinger med generatorene i den første perioden, imens den andre svinger mot. En usikkerhet er her at de to generatorene har ulik ytelse og produksjon. Dette kan påvirke resultatene.

**TABELL 4.25 SIMULERING AV GENERATOR SOM SVINGER MED OG MOT GENERATORENE G12, G13 OG G14.**

	G12	G13	G14
Medsving	G16 inne	G16 inne	G16 inne
Motsving	G15 inne	G15 inne	G15 inne

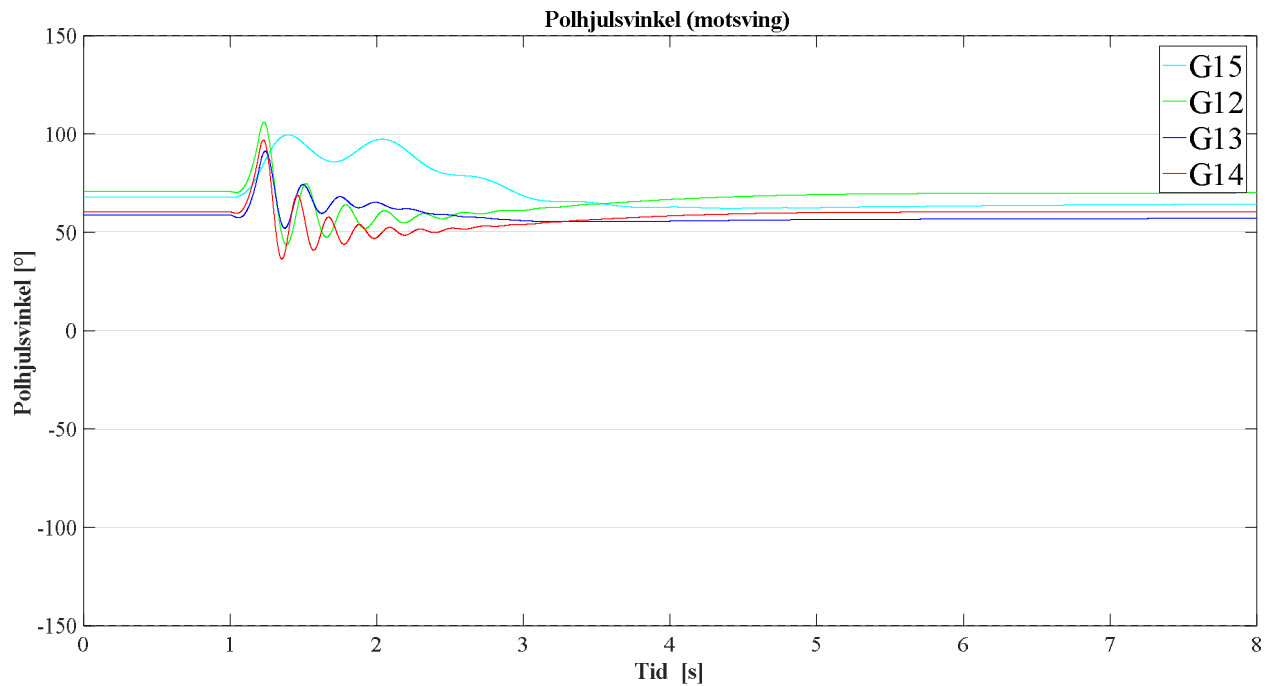
Generatorenes svingrespons er vist i figuren under. Simuleringen er gjort separat men presenteres i samme diagram. G15 og G16 endret seg lite mellom hver simulering.



**FIGUR 4.13 SVINGERESPONS TIL GENERATORENE MED G16 LIGGENDE INNE.**



## Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk

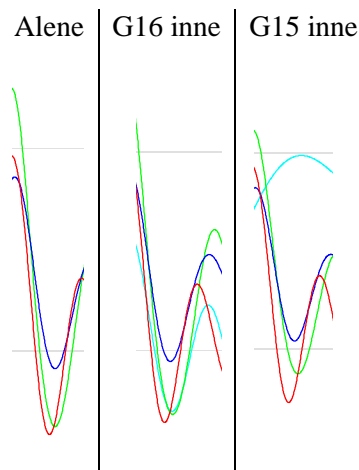


FIGUR 4.14 SVINGERESPONS TIL GENERATORENE MED G15 LIGGENDE INNE.

Generatorenes høyeste utsving i andre halvperiode er notert for simulering alene, med G15 og med G16. Et utklipp av denne halvperioden er presentert i Figur 4.15. Et utklipp fra generatorene alene i nettet er også lagt ved til sammenligning.

TABELL 4.26 RESULTAT FRA SIMULERINGENE MED G15 OG G16 INNE. HØYESTE UTSVING I ANDRE HALVPERIODE ER PRESENTERT.

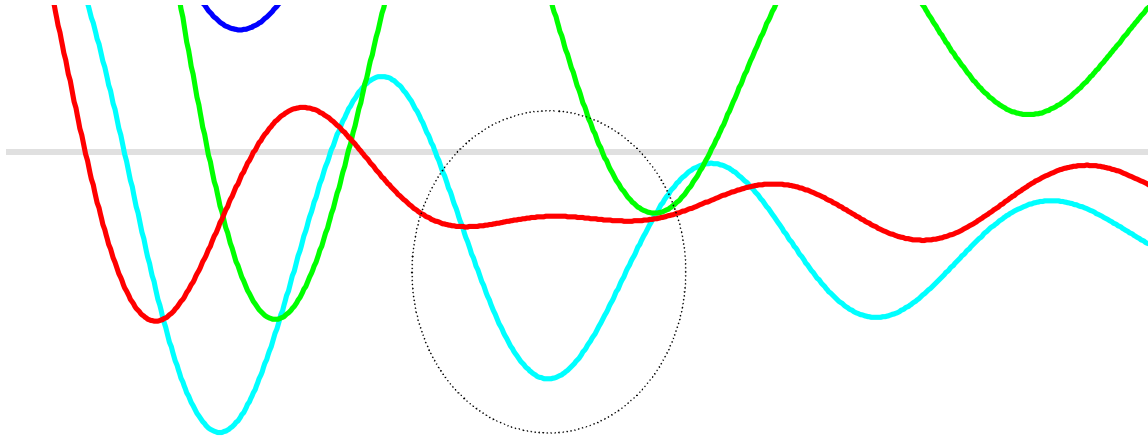
	G12	G13	G14
G16 inne (Medsving)	41,85 °	49,7°	35,46°
G15 inne (Motsving)	43,67 °	52 °	36,4°



FIGUR 4.15 UTKLIPP FRA SVINGERESPONS MED GENERATORENE LIGGENDE ALENE I NETTET, G16 INNE OG G15 INNE.

## Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk

Resultatene viser at G12, G13 og G14 har en noe lavere utsving ved G15 inne. Dette kan også være påvirket av at G15 har lavere produksjon enn G16. Et tydeligere eksempel er fra Figur 4.13 hvor G16 ser ut til å kansellere en svingning hos G14. Et utklipp av dette er vist under. Vil minne om at G14 og G16 ligger alene i nettet under simuleringen.



FIGUR 4.16 UTKLIPP AV SVINGERESPONS MED G16 INNE. VISER HVORDAN G14 PÅVIRKES NÅR G16 SVINGER IMOT.

Resultatene viser at det er en grad av påvirkning fra småkraftsgeneratorer som svinger med og mot hverandre i samme nett. En annen observasjon er at generatorene svingte seg mer ut da de lå alene i nettet. Uansett så ser generatorsvingninger ut til å ha **liten** påvirkning på generatorenes dynamiske stabilitet.

### 4.3.12 Last i systemet

I disse simuleringene økes lasten i modellen til nominell last.

**TABELL 4.27 REDUKSJON AV LAST I NETTMODELLEN.**

	LAST
Utgangspunkt	0,84 + j 0,197 MVA
Økt last	3,979 + j 0,933 MVA

Maksimalt utsving er notert både før og etter lastøkningen.

**TABELL 4.28 RESULTAT FRA SIMULERINGENE MED HØY OG LAV LAST I NETTMODELLEN.**

	G12	G13	G14
Utgangspunkt	110,7°	92,9°	98°
Økt last	110,5°	93°	96,7°

Resultatene at lasten i modellen har **lite** eller ingen påvirkning på generatorenes dynamiske stabilitet.

### 4.3.13 Nettets kortslutningsytelse $S''_k$

I disse simuleringene senkes kortslutningsbidraget fra det matende nettet.

TABELL 4.29 REDUKSJON AV KORTSLUTNINGSBIDRAG FRA MATENDE NETT.

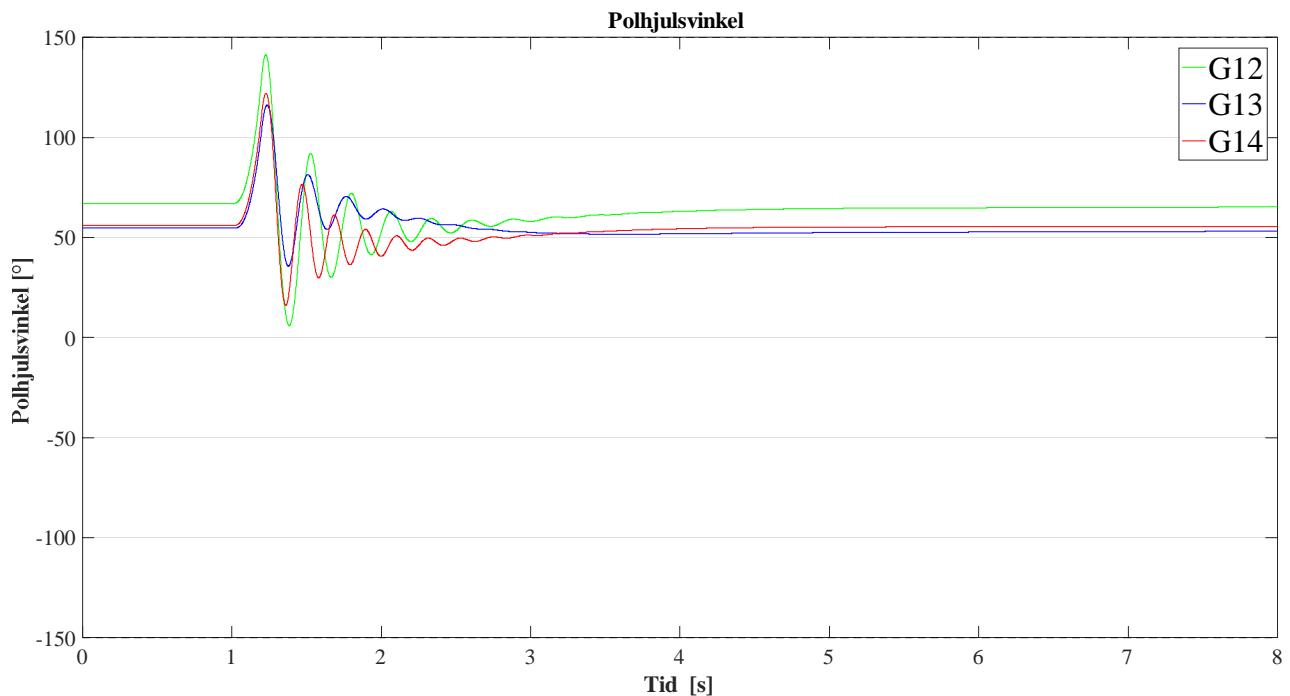
	LAST
Utgangspunkt	1356 MVA
Redusert $S''_k$	500 MVA

Maksimalt utsving er notert både før og etter endringen i kortslutningsbidrag.

TABELL 4.30 RESULTAT FRA SIMULERINGENE MED HØYT OG LAVT KORTSLUTNINGSBIDRAG FRA MATENDE NETT.

	G12	G13	G14
Utgangspunkt	110,7°	92,9°	98°
Redusert $S''_k$	141,3°	116,2°	122°

Generatorenes svingrespons med lavt kortslutningsbidrag er vist i figuren under. Simuleringen er gjort separat, men presenteres i samme diagram.



FIGUR 4.17 SVINGERESPONS TIL GENERATORENE MED LAVT KORTSLUTNINGSBIDRAG FRA MATENDE NETT.

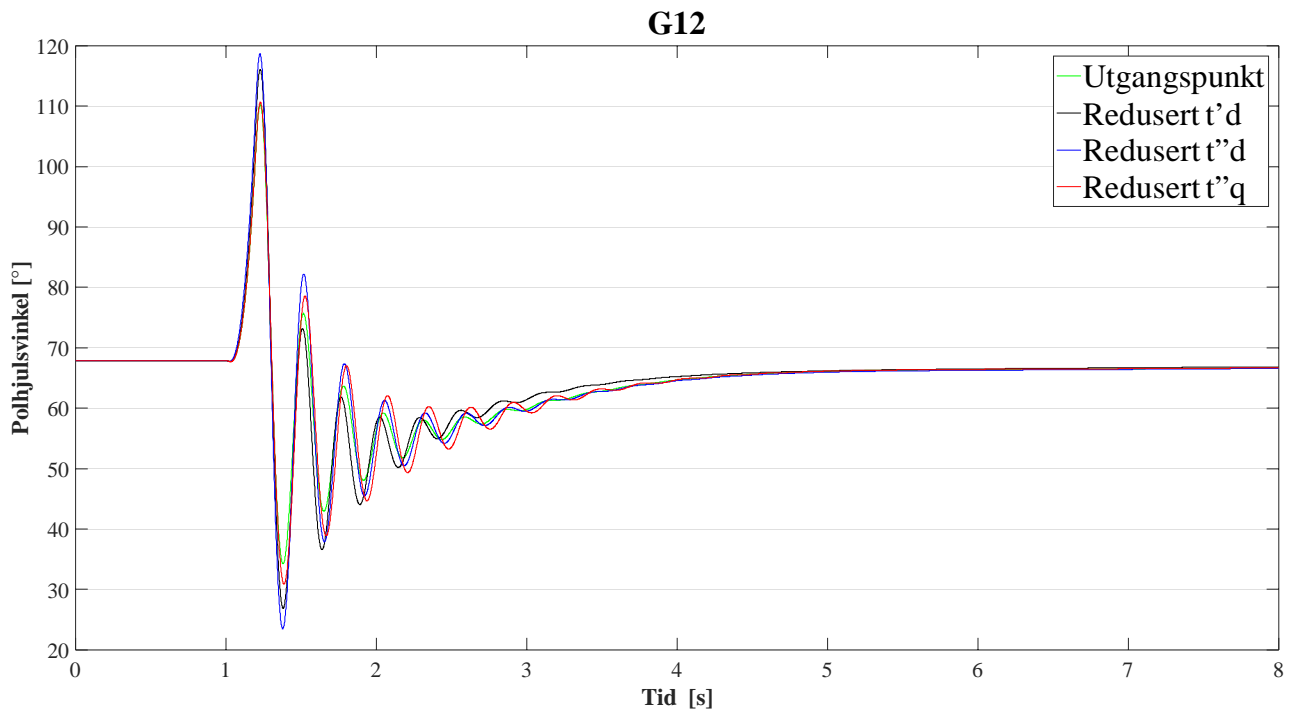
Resultatene viser at kortslutningsbidraget fra matende nett har **stor** påvirkning på generatorenes transiente stabilitet.

### 4.3.14 Tidskonstanter

I disse simuleringene reduseres generatorenes tidskonstanter med 50 %. Simuleringene er gjort separat, men presenteres i samme diagram.

TABELL 4.31 REDUSERING TIDSKONSTANTER PÅ GENERATOR G12.

	UTGANGSPUNKT	REDUSERT
Transient, $t'_d$	0,456 pu	0,228 pu
Subtransient d-akse, $t''_d$	0,039 pu	0,0195 pu
Subtransient q-akse, $t''_q$	0,026 pu	0,013 pu

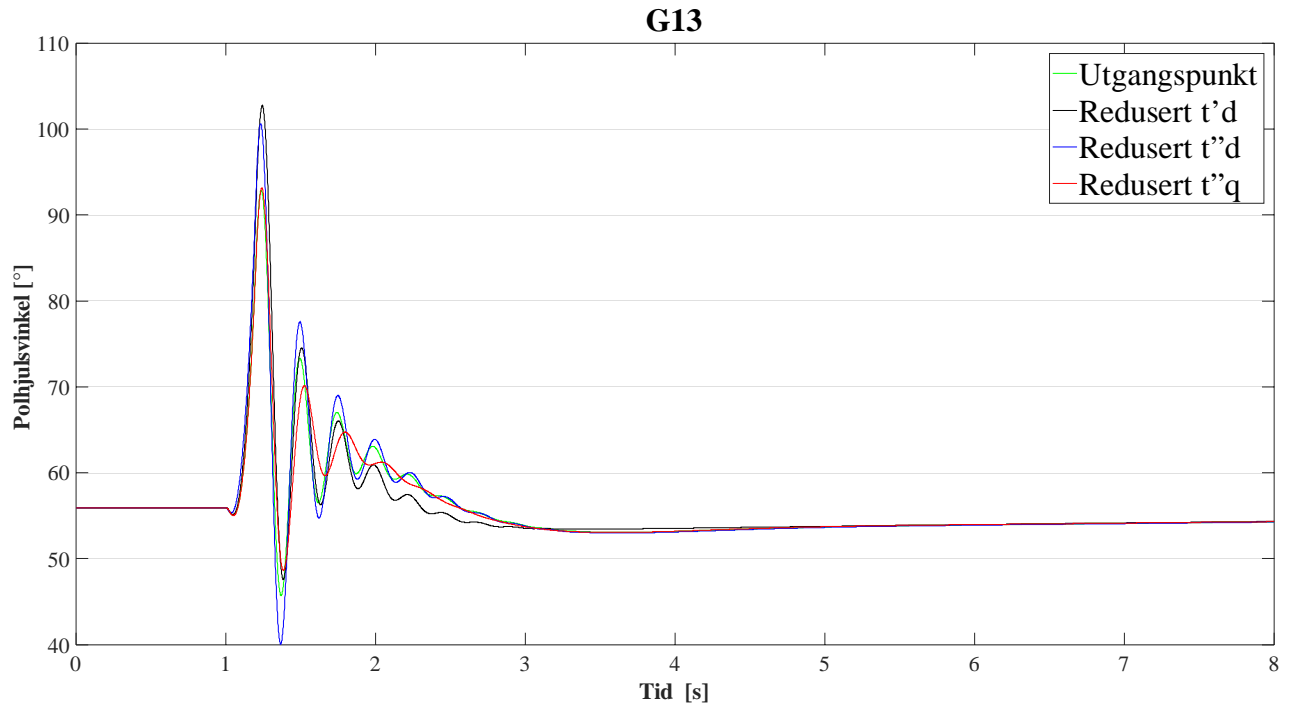


FIGUR 4.18 SVINGERESPONS TIL G12 MED OG UTEN REDUSERTE TIDSKONSTANTER.

## Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk

TABELL 4.32 REDUSERING TIDSKONSTANTER PÅ GENERATOR G13.

	UTGANGSPUNKT	REDUSERT
Transient, $t'_d$	0,515 pu	0,2575 pu
Subtransient d-akse, $t''_d$	0,025 pu	0,0125 pu
Subtransient q-akse, $t''_q$	0,05 pu	0,025 pu

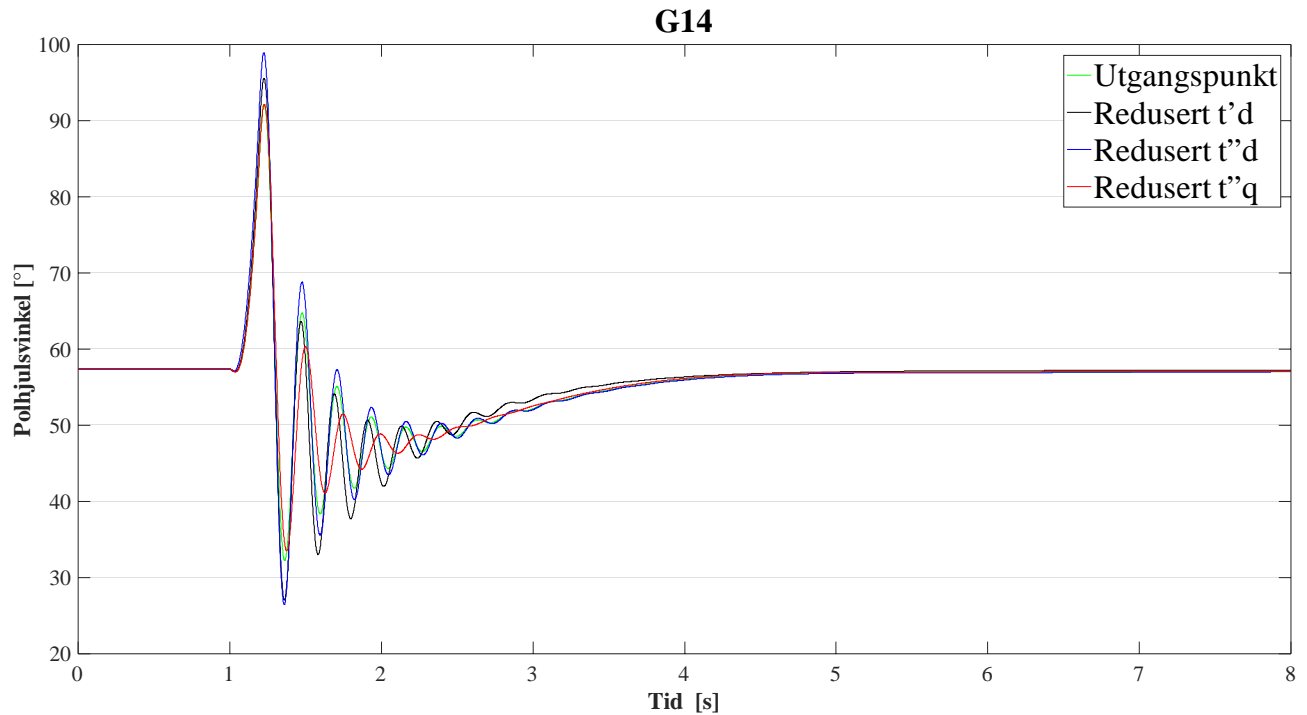


FIGUR 4.19 SVINGERESPONS TIL G13 MED OG UTEN REDUSERTE TIDSKONSTANTER.

## Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk

TABELL 4.33 REDUSERING TIDSKONSTANTER PÅ GENERATOR G14.

	UTGANGSPUNKT	REDUSERT
Transient, $t'_d$	0,514 pu	0,257 pu
Subtransient d-akse, $t''_d$	0,026 pu	0,013 pu
Subtransient q-akse, $t''_q$	0,052 pu	0,026 pu



FIGUR 4.20 SVINGERESPONS TIL G14 MED OG UTEN REDUSERTE TIDSKONSTANTER.

Resultatene viste at reduksjon i tidskonstantene  $t''_d$  og  $t'_d$  ga noe endring i utsvinget. Den subtransiente tidskonstanten  $t''_q$  hadde lite påvirkning på utsvinget.

## 4.4 Konklusjon

### 4.4.1 Nettfeil for dimensjonering av generatorer

Det er blitt gjennomført en undersøkelse av FRT egenskapene til 20 generatorer, hvor restspenning og varighet var variablene. Resultatene viste at det var en god del av generatorene hadde mye bedre FRT egenskaper enn forventet. Dette kan være generatorer som er kjøpt inn de siste årene, med bakgrunn i krav satt av Siemens PTI.

Et ønske med denne undersøkelsen var å lage et grunnlag for valg av dimensjonerende feil til Voss-studien. I flere av Siemens PTI sine analyser er dimensjonerende feil satt med restspenning 20 % og varighet 200 ms. Undersøkelsen viste at en slik feil kan gi et godt bilde på generatorenes transiente egenskaper. Dette fordi den ligger et sted mellom hva gode og dårlige (dynamisk) generatorer tåler. Det stemmer også overens med verifiseringen med Rasdalen, hvor det ville blitt konkludert med ustabil generator uavhengig av kapasitiv eller induktiv drift.

Statikk<sup>6</sup> fra SINTEF [19] (se Vedlegg A.1) viser at 43 av 55 feil førte til en restspenning høyere enn 40 %. 5 av 12 feiler med restspenning under 40 % hadde varighet mindre enn 0,1 s. Statikken viser at Siemens PTI sin dimensjonerende feil vil dekke de fleste feilsituasjoner.

**En feil med 20 % restspenning og varighet 200 ms vil derfor bli brukt som dimensjonerende i Voss-studien.**

---

<sup>6</sup> Mellom 1993 og 2003 utarbeidet SINTEF statistikk på spenningsdipp fra over 800 målepunkter i Norge.



#### 4.4.2 Parametres påvirkning på generatorers stabilitet

I denne delen av studien ble påvirkningen av ulike parametre testet for tre av de 20 generatorene fra FRT-undersøkelsen. Resultatene er presentert under:

TABELL 4.34 RESULTAT FRA STUDIE AV PARAMETRES PÅVIRKNINGSKRAFTEN PÅ GENERATORENES STABILITET.

	PARAMETER	PÅVIRKNINGSKRAFT (HYPOTESE)	PÅVIRKNINGSKRAFT (RESULTAT)
<b>Generator og AVR</b>	Svingmasse J/H	Stor	<b>Stor</b>
	$x_d$	Medium	<b>Medium</b>
	$x_q$	Liten	<b>Medium</b>
	$x'_d$	Stor	<b>Stor</b>
	$x''_d$ og $x''_q$	Liten	<b>Stor</b>
	$t'_d$	Medium	<b>Medium</b>
	$t''_d$	Liten	<b>Medium</b>
	$t''_q$	Liten	<b>Liten</b>
	AVR	Stor	<b>Liten</b>
	Tuning av AVR	Liten	<b>Liten</b>
<b>Nettverk</b>	Effektproduksjon før feil - P	Stor	<b>Stor</b>
	Effektproduksjon før feil - Q	Medium	<b>Stor</b>
	Generatorsvigninger	Liten	<b>Liten</b>
	Last i systemet	Liten	<b>Liten</b>
	Nettets kortslutningsytelse	Stor	<b>Stor</b>

Resultat med størst med avvik var hvor lite AVR hadde å si for resultatene. Dette kan være fordi AVR ikke er hurtig nok for den korte feilvarigheten. Alle disse generatorene har mindre ytelse enn kravet for statisk magnetisering satt av Statnett [9]. Det antas derfor børsteløs magnetisering som er et tregere reguleringsystem. Derfor kan AVR ha lite påvirkningskraft på småkraftverk generelt under så korte feilsituasjoner.

Hvor godt AVR var tunet hadde også lite å si. Dette er positivt da det er vanskelig å få en eksakt lik steprespons i modellen som på den aktuelle stasjonen. Det må derfor utføres tester hvis det ikke foreligger dokumentasjon. For å spare tid trengs ikke dette å prioriteres i slike analyser. Å tune seg innenfor kravene skal være nok.

En annen interessant observasjon er at reduksjon i subtransiente reaktansene ( $x''_d$  og  $x''_q$ ) hadde en del å si for utsvinget. En mulig forklaring er at det maksimale utsvinget, som er studert, oppstår i den subtransiente perioden. Den tilhørende tidskontanten har derfor noe å si. Resultatene viser at varigheten til  $t''_d$  hadde større påvirkning på generatorenes stabilitet enn  $t''_q$ .

Resultatene viste at småkraftverkenes generatorsvigninger hadde liten påvirkning på hverandre. Situasjonen var verre når generatorene lå alene i nettet. Dette kan forklares med at det er flere generatorer som regulerer spenningen, slik at generatorene ikke trenger å ligge så induktivt før feilen inntreffer.

## Test av FRT egenskaper til typiske småkraftverk

Effektproduksjonen av generatoren har stor påvirkning. I et småkraftverk uten magasin vil generatoren store deler av året ikke gå med full produksjon. Feilsituasjon som oppstår ved flomperioder er derfor mer kritisk enn tilsvarende på vinteren.

### 4.4.3 Utførelse av dynamiske analyser

Til oppsummering må de som bestiller analyser ikke oppgi opplysninger som fører til modellering

- av generatorer med for høyt treghetsmoment
- av generatorer med for lave reaktanser
- av modeller som gir for lav spenning (fører til overmagnetiserte generatorer)
- av modeller med for høy kortslutningsytelse fra matende nett

Dette kan føre til at analysen blir for lite konservativ, som kan gi konsekvenser for systemstabiliteten. I tillegg vil mest trolig utbygger utfordre kravene for å gjøre stasjonen billigere. Dette ved, for eksempel, å legge seg på eller rett under kravene. Analytikere bør, i tillegg til å forholde seg til REN, legge inn marginer som tar stilling til usikkerheter som gir mildere krav. Forslag på hvordan dette kan oppfylles er

- å sette grense for definisjonen av stabil enhet, f.eks  $\delta < 150^\circ$ .
- å la generatorer ligge alene i nettet ved simuleringer.
- å modellere verste tilfelle, herunder modellere lettlast, full produksjon, streng dimensjonerende feil

Hvorvidt dette gjør analysen konservativ vil bli videre sett på i Voss-studien.

# 5 MODELLERING AV KRAFTSYSTEMET UNDER EVANGER

Dette kapitlet beskriver hvordan nettmodellen er bygd opp i PSS@SINCAL og hvilke valg som er tatt. Innledningsvis vil nettet i Evanger med produksjonsenheter bli presentert.

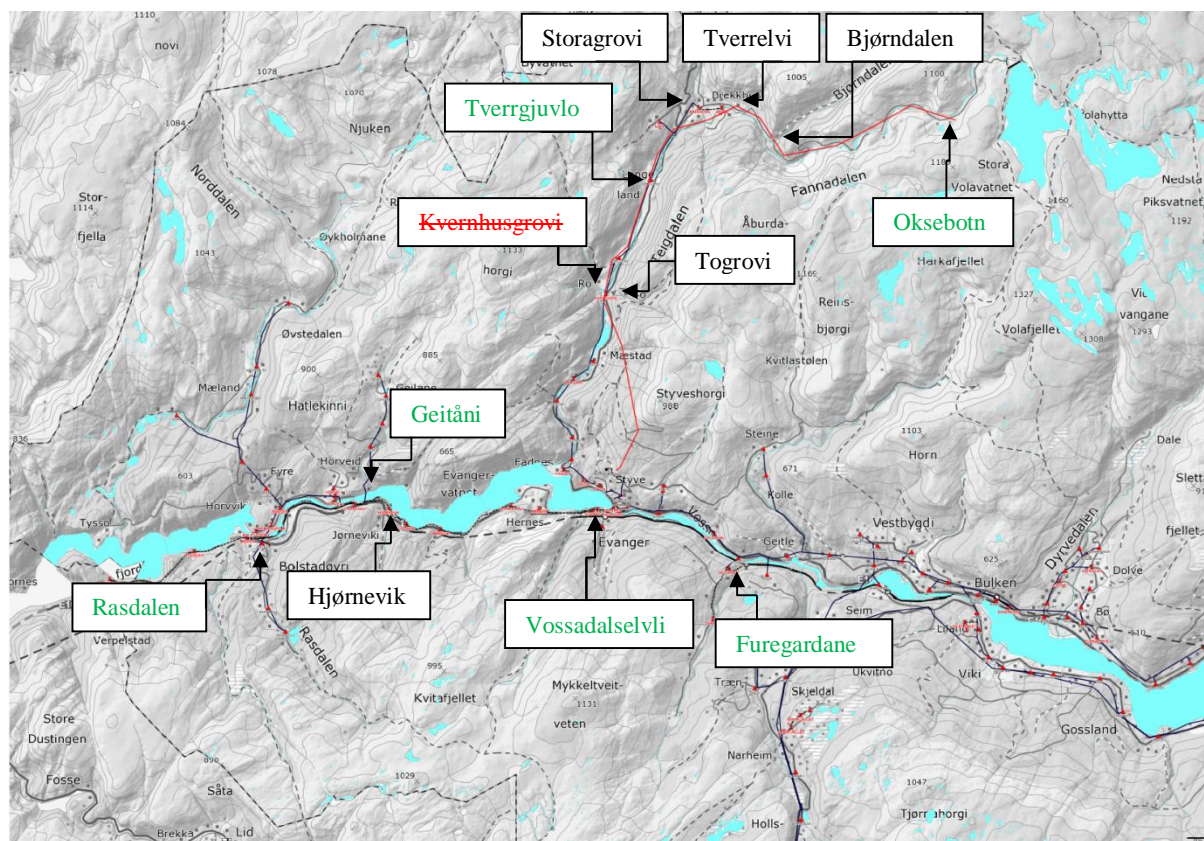
## 5.1 Nettet rundt Evanger sentrum

Evanger er et lite tettsted i Voss kommune hvor Voss Energi Nett er netteier. I distribusjonsnettet under Evanger Transformatorstasjon er det i dag fem småkraftverk som er i drift. I tillegg er det seks som enten er under bygging, eller venter konsesjonsbehandling. Småkraftverkene har en ytelse på 2,3 - 11,4 MW. Det vil si at et av kraftverkene i denne studien ikke kan kategoriseres som småkraft. Systemspenningen i nettet er 22 kV. Oversikten over de ulike stasjonene, utbyggerne, ytelse og status er gitt i Tabell 5.1. Kraftverkene geografiske plassering er vist i Figur 5.1. Generator til Geitåni ble i bestilt i mars 2017. Den vil i denne studien bli behandlet som i drift.

## Modellering av kraftsystemet under Evanger

TABELL 5.1 OVERSIKT OVER EKISTERENDE OG AKTUELLE SMÅKRAFTVERK I TILKNYTNING TIL EVANGER.

STASJONSNAVN	UTBYGGER	STØRRELSE [MW]	STATUS
Oksebotn kr.st	BKK-produksjon	11,4	I drift
Tverrgjuvlo	BKK-produksjon	5,5	I drift
Rasdalen kr. st.	Småkraft AS	5,2	I drift
Furegardane kr.st.	Småkraft AS	5,2	I drift
Vossadalselvi	Clements kraft	7,5	I drift
Geitåni kr.st.	Kraftkarane	5,2	Under bygging
Tverrelvi kr.st	Nors Grønnkraft	4,4	Venter konsesjonsbehandling
Togrovi kr.st.	Nors Grønnkraft	3,3	Venter konsesjonsbehandling
Storagrovi kr.st.	Voss Energi	3,3	Venter konsesjonsbehandling
Bjørndalen kr.st.	Nors Grønnkraft	2,3	Venter konsesjonsbehandling
<del>Kvernhusgrovi kr.st.</del>	<del>Nors Grønnkraft</del>	<del>1,8</del>	<del>Søknad trukket. Tas ut av studiet</del>
Hjørnevik kr.st.	Småkraft AS	2,5	Fått konsesjon. Ikke planlagt.



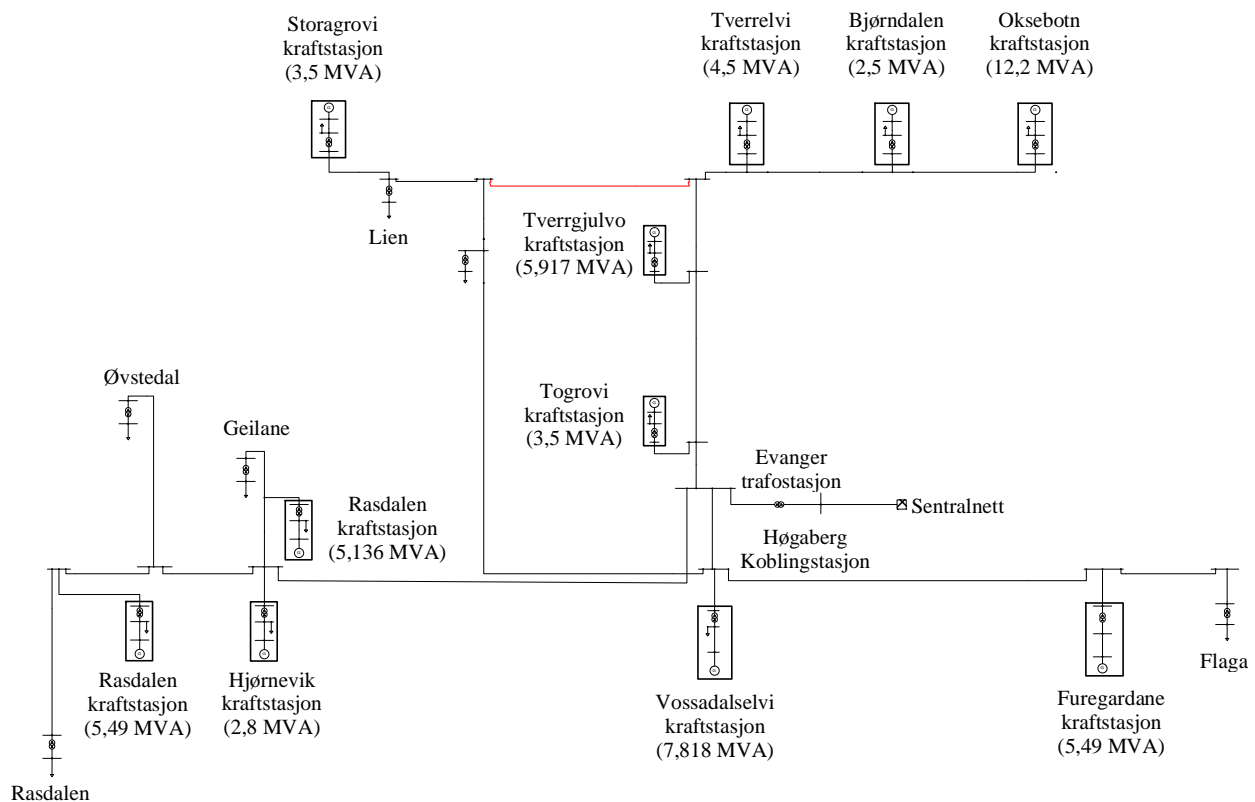
FIGUR 5.1 GEOGRAFISK PLASSERING AV SMÅKRAFTVERKENE.

## 5.2 Etablering av nettmodell

Nettmodellen er importert fra en tidligere lastflytstudie i samme nett, gjort av prosjektingeniør Sindre Solberg i Siemens PTI. Dette studiet ble gjort med beregningsverktøyet PSS®E og ble importert fra Voss Energi Nett sin Cascademodell<sup>7</sup>. Cascademodellen ble eksportert som tekstfil og importert i PSS®E som rawfil. Videre ble Sindre sin ferdige modell importert som rawfil i PSS®SINCAL.

En rawfil mangler grafikken. Derfor lager PSS®E en sldfil (Single Line Diagram) som gir en visuell visning av nettet. Denne filen kan ikke importeres til PSS®SINCAL og ble videre eksportert til drawformat. Dette ble gjort ved hjelp av softwareutviklere ved PTI sitt hovedkvarter i Erlangen, Tyskland.

Videre endringer i modellen er gjort basert på enlinjeskjema fra dagens nett. Dette ble gjort i sommerjobb hos Siemens. Figur 5.2 viser en forenklet utgave simuleringsmodellen i vektorgrafikk. Figur av simuleringsmodellen slik den fremstår i PSS®SINCAL er vist i Vedlegg B.1.



FIGUR 5.2 FORENKLET UTGAVE AV SIMULERINGSMODELLEN.

Lasten er modellert som lettlast for å gi verste tilfelle. Den er gitt av Voss Energi til å være:

<sup>7</sup> Powel Cascade AS er en leverandør av teknisk støttesystemer til nettselskaper i Norge. Dette er en løsning som mange små og mellomstore selskaper benytter seg av, slik at de slipper å sitte på dyr programvare og kompetanse.[20]

## Modellering av kraftsystemet under Evanger

TABELL 5.2 LASTEN I MODELLEN.

AKTIV EFFEKT		REAKTIV EFFEKT	
[% av tunglast]	[MW]	[% av tunglast]	[MVar]
21,11	0,840	21,15	0,210

### 5.3 Verifisering av simuleringsmodell

Modellen verifiseres ved å sammenligne Cascademodellen til Voss Energi og PSS@SINCAL modellen. Dette er gjort ved å utføre lastflyt- og trefase kortslutningsberegning.

Lastflytanalysen og kortslutningsberegningene er utført med alle kraftverkene liggende frakoblet, altså kun sentralnettet som produksjonskilde. Sentralnettet er modellert som eksternt nett med R/X-forhold og kortslutningsbidrag. Disse er beregnet av BKK på høyspentsiden av transformatoren i Evanger Transformatorstasjon. De er vedlagt i Vedlegg B.2. Resultatet fra utvalgte noder i nettet ligger i Tabell 5.3 og Tabell 5.4. De utvalgte nodene ligger ytterst på hver sin del av nettet, vist i Figur 5.2.

TABELL 5.3 SAMMENLIGNING AV NODESPENNINGER MELLOM VOSS SIN CASCADEMODEL OG PSS@SINCAL MODEL.

OMRÅDE	TRAFROID	SPENNING	SPENNING	DIFFERANSE	
		Cascade [kV]	PSS@SINCAL [kV]	[kV]	[%]
Rasdalen	NS14122	21,891	21,873	0,0178	0,081
Lien	NS14309	21,880	21,865	0,0151	0,069
Flaga	NS13720	21,878	21,863	0,0150	0,069
Øvstedal	NS14115	21,887	21,871	0,0158	0,072

TABELL 5.4 SAMMENLIGNING AV KORTSLUTNINGSSTRØM MELLOM VOSS SIN CASCADEMODEL OG PSS@SINCAL MODEL.

OMRÅDE	TRAFROID	3-FASE IKMAX	3-FASE IKMAX	DIFFERANSE	
		Cascade [kA]	PSS@SINCAL [kA]	[kA]	[%]
Rasdalen	NS14122	2,539	2,455	0,084	3,31
Lien	NS14309	1,681	1,589	0,092	5,47
Flaga	NS13720	2,053	1,928	0,125	6,09
Øvstedal	NS14115	2,103	2,044	0,059	2,81

Det er noe avvik mellom modellene. Det kan være på grunn av regnemetoden simuleringsverktøyene bruker, og endringer som er gjort i sommerjobben. I kortslutningsberegningene i PSS@SINCAL er valgt å bruke utregningsmetoden fra IEC 60909 [21]. Cascade-modellen sin beregningsmetode er ukjent. Kablene som er endret eller lagt inn i sommerjobben har antatte verdier etter kabelboka til Nexans [22].

## 5.4 Modellering av småkraftverk

Kraftverkene var inkludert i den eksporterte fila, men var mangelfull. Mye av generatordata manglet og ble etterspurt. Alle generatorene er modellert som PV kilder det vil si med AVR som er innstilt til 22 kV spenning på stasjonstransformatorens sekundærside. Produksjon av reaktiv effekt er innstilt til effektbånd foreslått av REN,  $\cos = -0,95$  (induktivt) til  $\cos = 0,9$  (kapasitivt). Generatorene er innstilt til å gå med full aktiv effektproduksjon som foreslått i kapittel 4.4.3.

### 5.4.1 Synkrongeneratordata

Tabell 5.5 viser komponentdata for generatorene til småkraftverkene som er i drift. Disse er innhentet av Voss Energi. De røde tallene ble ikke innhentet og er derfor antatt. Antagelser er basert blant annet på data fra lignende generator gitt av fra datainnsamlingen [18]. Kapittel 3.3.1 beskrev hvordan reaktansen i q-aksen er lik i transient og stasjonær periode for generatorer med utpregede poler. Dette gjelder for Vossadalselvi og Tverrgjuvlo og er bakgrunn for antagelsen av  $x'_q$ . Tverrgjuvlo og Oksebotn sin svingmasse var oppgitt som svingmoment,  $GD^2$ . Utregning av treghetskonstanten, for disse kraftverkene, er vist i Vedlegg F.2.

Geitåni sitt datablad inkluderte ikke tidskonstanter eller q-akse reaktanser. Det vil derfor være noen usikkerheter i resultatene rundt denne generatoren.

TABELL 5.5 KOMPONENTDATA FOR SMÅKRAFTVERKENE.

	OKSEBOTN	VOSSADALSELVI	TVERRGJUVLO	FUREGARDANE	RASDALEN	GEITÅNI
$S_N$ [MVA]	12,2	7,818	5,917	5,49	5,49	5,136
$U_N$ [kV]	5,5	6,6	6,3	6,6	6,6	6,6
n [rpm]	600	1000	1000	750	750	600
$x_d$ [pu]	1,25	1,502	1,76	1,48	2,3209	1,429
$x'_d$ [pu]	0,27	0,234	0,287	0,358	0,2785	0,337
$x''_d$ [pu]	0,26	0,165	0,183	0,264	0,172	0,267
$x_q$ [pu]	0,73	0,769	1,75	0,75	2,2966	0,6
$x'_q$ [pu]	0,73	0,769	1,75	0,75	2,2966	0,6
$x''_q$ [pu]	0,3	0,154	0,221	0,33	0,1948	0,15
$t'_d$ [s]	0,9	0,489	0,28	0,51	0,2446	0,5
$t''_d$ [s]	0,024	0,012	0,01	0,011	0,0615	0,01
$t''_q$ [s]	0,02	0,02	0,02	0,01	0,0079	0,01
H [Ws/Va]	1,03	0,75	0,51	0,71	0,69	0,42
J [kgm <sup>2</sup> ]	6375	1072,2	552,5	1262	1220	1085
Feltregulering	Børsteløs	Børsteløs	Børsteløs	Børsteløs	Børsteløs	Børsteløs

Dynamisk modellering av de nye generatorene gjøres i detalj i kapittel 6.4. Det var bare effektproduksjonen til generatorene som var oppgitt. Alle andre data er derfor antatt. Spenningen er satt med bakgrunn i anbefaling fra Voith Hydro, om å ha høyspent terminalspenning (3.3-12kV) på generatorer med ytelse fra 2 MVA. [10]

TABELL 5.6 DYNAMISKE PARAMETRE TIL NYE GENERATORENE.

		TVERRELVI	TOGROVI	STORELVI	BJØRNDALEN	HJØRNEVIK
$P_N$	[kV]	4,4	3,3	3,3	2,3	2,5
$S_N$	[MVA]	4,89	3,67	3,67	2,56	2,78
$\cos \varphi$		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
$U_N$	[kV]	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
$n$	[rpm]	750	750	750	750	750
Feltregulering		Børsteløs	Børsteløs	Børsteløs	Børsteløs	Børsteløs

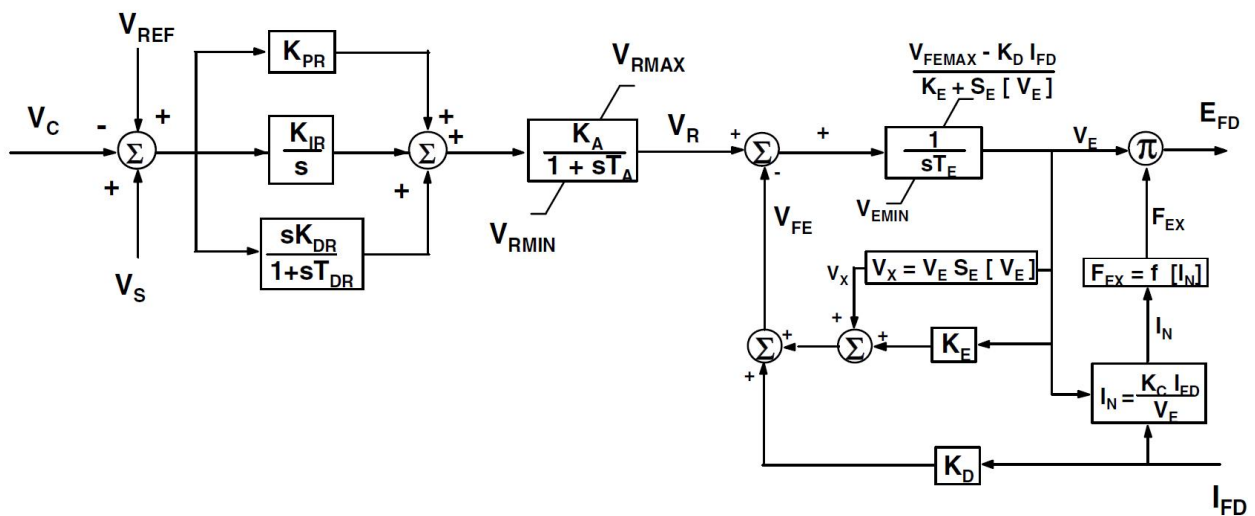
### 5.4.2 Turbinregulator (HYGOV)

I henhold til krav fra kapittel 4.2 punkt 1, skal aggregat, med ytelse over 10 MVA, ha fullverdig turbinregulator utstyrt for aktiv frekvensregulering. På grunn av dette er det antatt at Oksebotn er utstyrt med dette. Det er valgt å legge inn en frekvensregulator IEEE Standard type HYGOV i modellen med standardverdier foreslått av PSS®SINCAL. Blokkdiagram og parametre ligger i Vedlegg C.1.

### 5.4.3 Spenningsregulator (AC8B)

Samtlige kraftverk antas å ha børsteløs magnetiseringssystem. De eksisterende generatorene ble modellert i prosjektoppgaven. Geitåni og de nye kraftstasjonene ble modellert i denne oppgaven.

I modellen er dette modellert med IEEE standard AC8B. Et blokkdiagram av systemet er vist i Figur 5.3. I henhold til kravet fra kapittel 2.2.4 punkt 2 er AVR representert av PID-type, med separate konstanter for det proporsjonale ( $K_{PR}$ ), integrerende ( $K_{IR}$ ) og deriverende ( $K_{DR}$ ) pådraget. For å representere en digital AVR som forsyner likestrøm til en roterende feltvikling, så må  $K_D$  og  $K_C$  settes lik 0.[23]



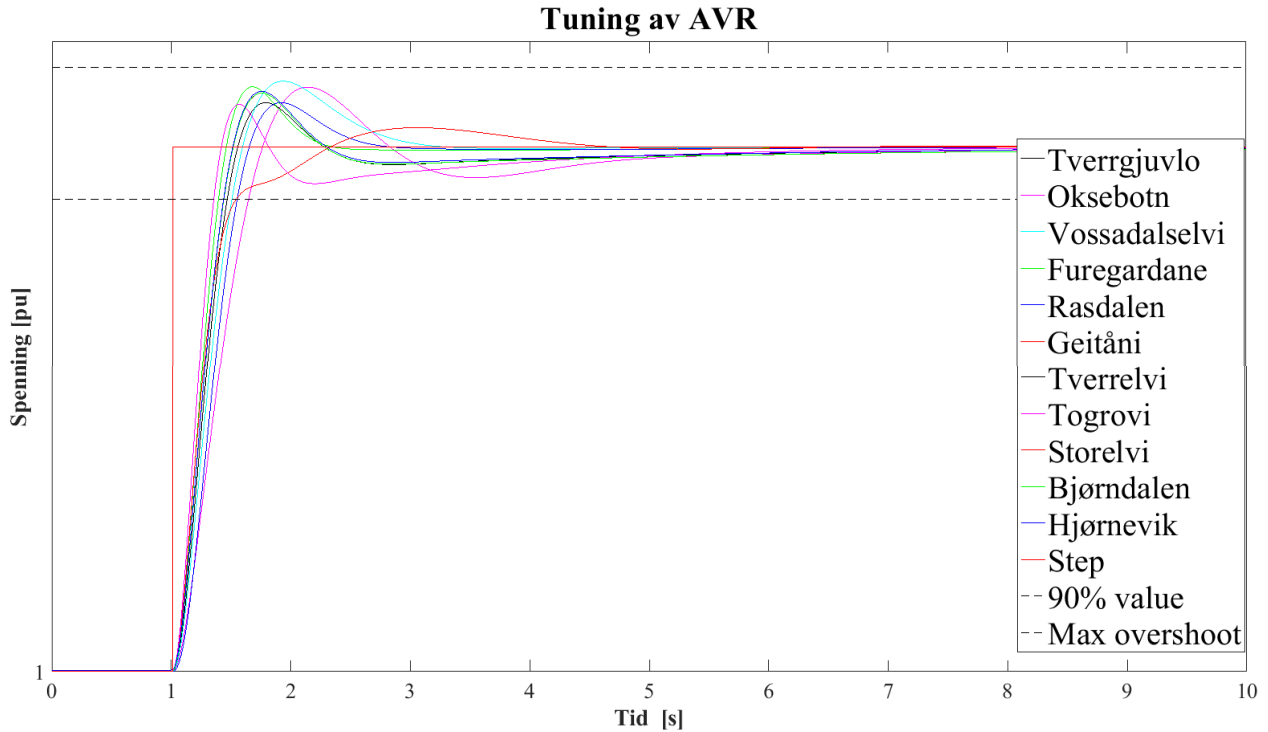
FIGUR 5.3 BLOKSKJEMA TIL AC8B. [23]



## Modellering av kraftsystemet under Evanger

Spenningsregulatorne ble tunet etter kravet om at spenningen skal være nådd 90 % av endelig (stasjonær) verdi innen 1 sekund. Dette ble gjort ved å sette på en 5 % sprangrespons (95 % → 100 % og 100 % → 105 %). Spenningen ble målt over generatorene frakoblet fra nettet.

Det ble tatt utgangspunkt i foreslåtte verdier fra IEEE [23]. Videre ble  $K_D$  og  $K_C$  satt lik 0.  $K_{PR}$ ,  $K_{IR}$  og  $K_{DR}$  ble justert for å tune inn spenningen. Negativt sprangrespons ble simulert først på grunn av utfordringen ved avmagnetisering som følge av generatorenes remanens<sup>8</sup>. Deretter ble positiv sprangrespons simulert for å finjustere pådragene. Vedlegg C.2 inneholder alle plot og innstillinger på generatorene. De nye generatorene må tunes på nytt når parametrene endres.

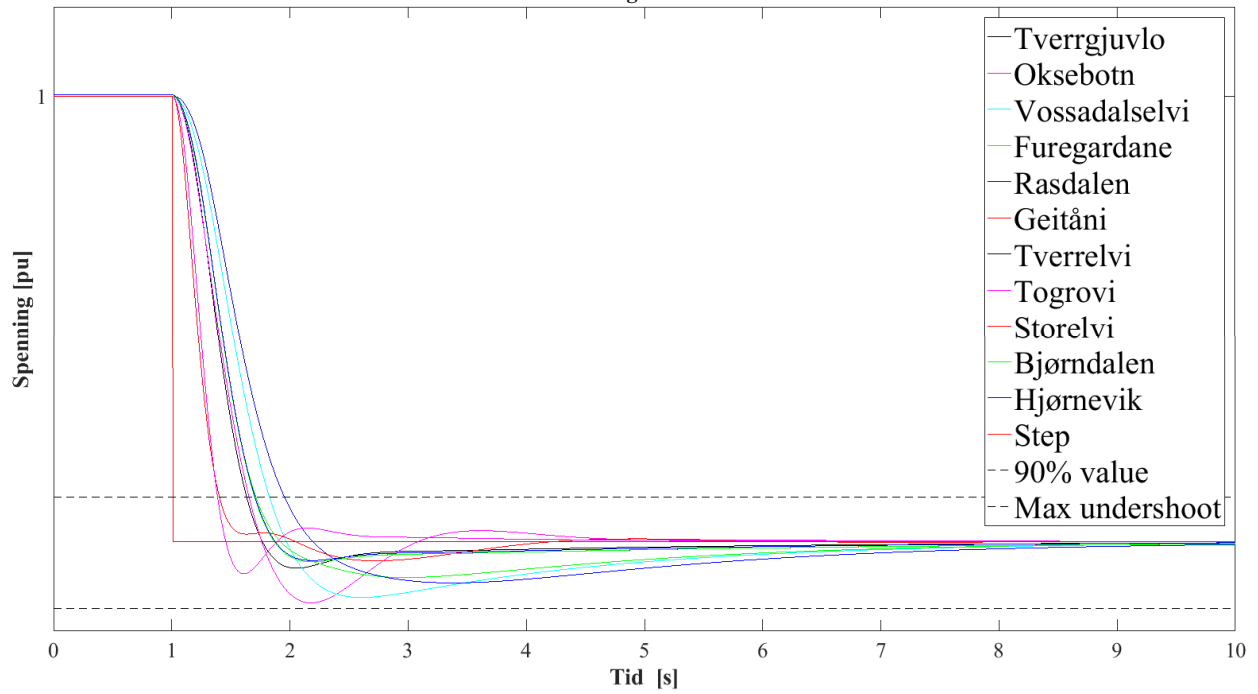


FIGUR 5.4 FERDIGTUNET SPRANGRESPONS I SPENNING FRA 100 % → 105 %.

<sup>8</sup> Remanens er magnetiseringen som blir igjen i et ferromagnetisk materiale etter at en påvirkning, som har gjort materialet magnetisk, er fjernet.

# Modellering av kraftsystemet under Evanger

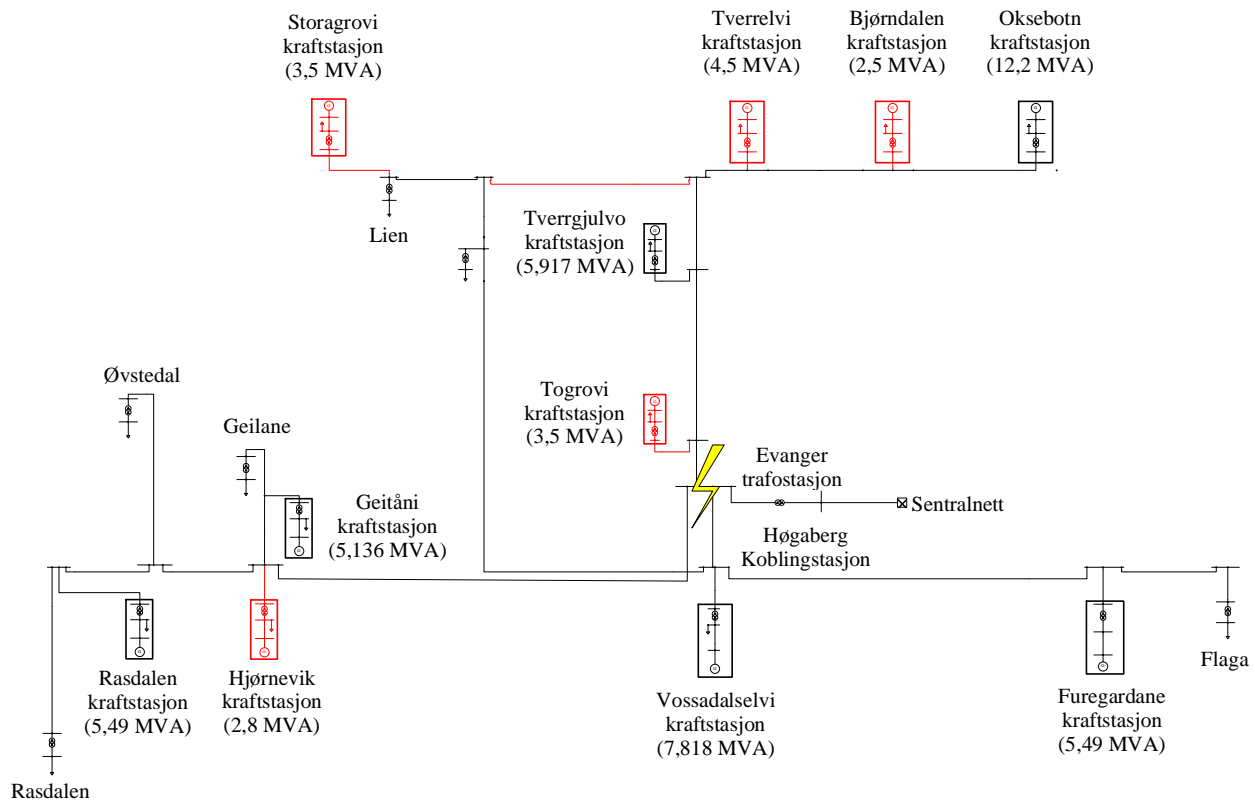
## Tuning av AVR



FIGUR 5.5 FERDIGTUNET SPRANGRESPONS I SPENNING FRA 100 % → 95 %.

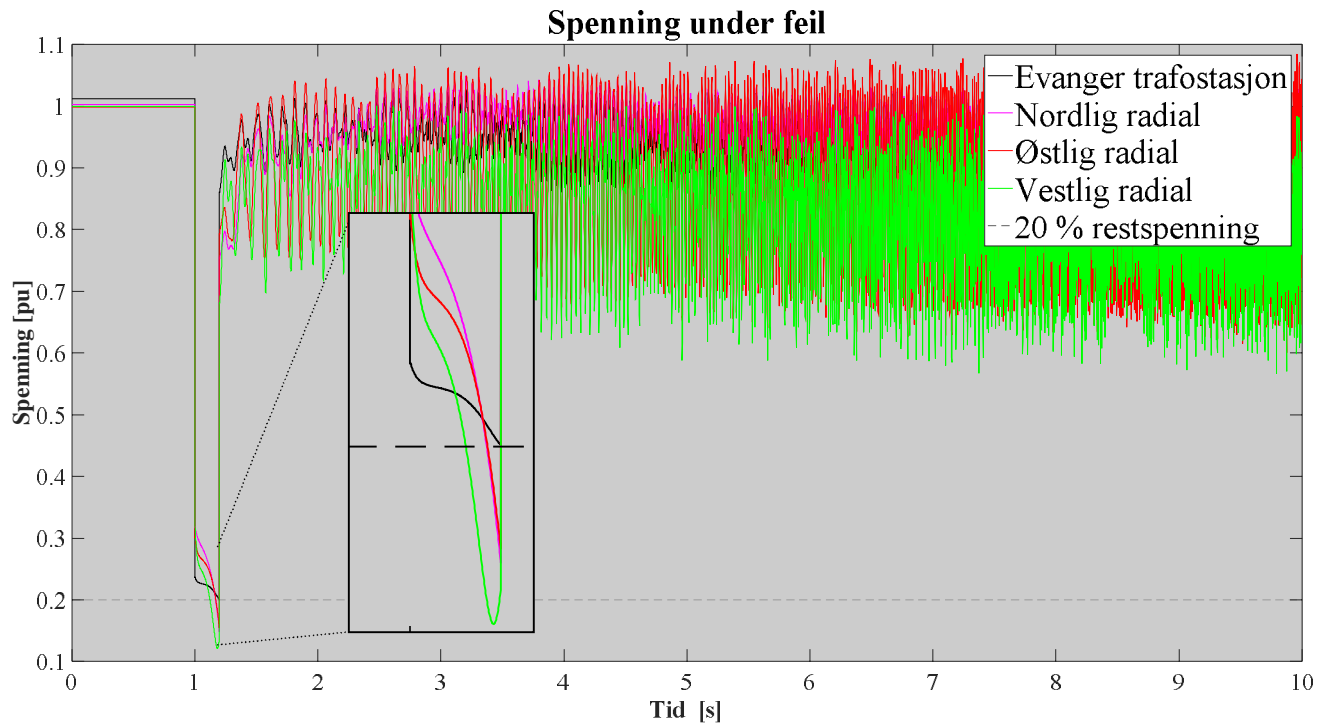
## 5.5 Modellering av feil

### 5.5.1 Modell med eksisterende generatorer



FIGUR 5.6 FORENKLET SIMULERINGSMODELL MED FEIL.

I kapittel 4.4.1 ble det argumentert for å legge inn feil med 20 % restspenning og varighet 200 ms. Dette oppnås ved å legge overgangsmotstand i feilstedet som tunes inn mot riktig spenning. Feilen ble lagt i Evanger Transformatorstasjonen fordi det viste seg å gi det verste tilfellet. Dette fordi spenningen på utover radialene ble verre enn i feilstedet, noe som er uventet. Dette er vist i Figur 5.7. Oscilleringene i spenningen oppstår fordi en eller flere generatorer ble ustabile.



FIGUR 5.7 SPENNING ULIKE STEDER I NETTET UNDER FEIL.

For å finne ut hvorfor dette oppstår, utføres det en stasjonær lastflytanalyse for å se situasjonen i nettet før feilen oppstår.

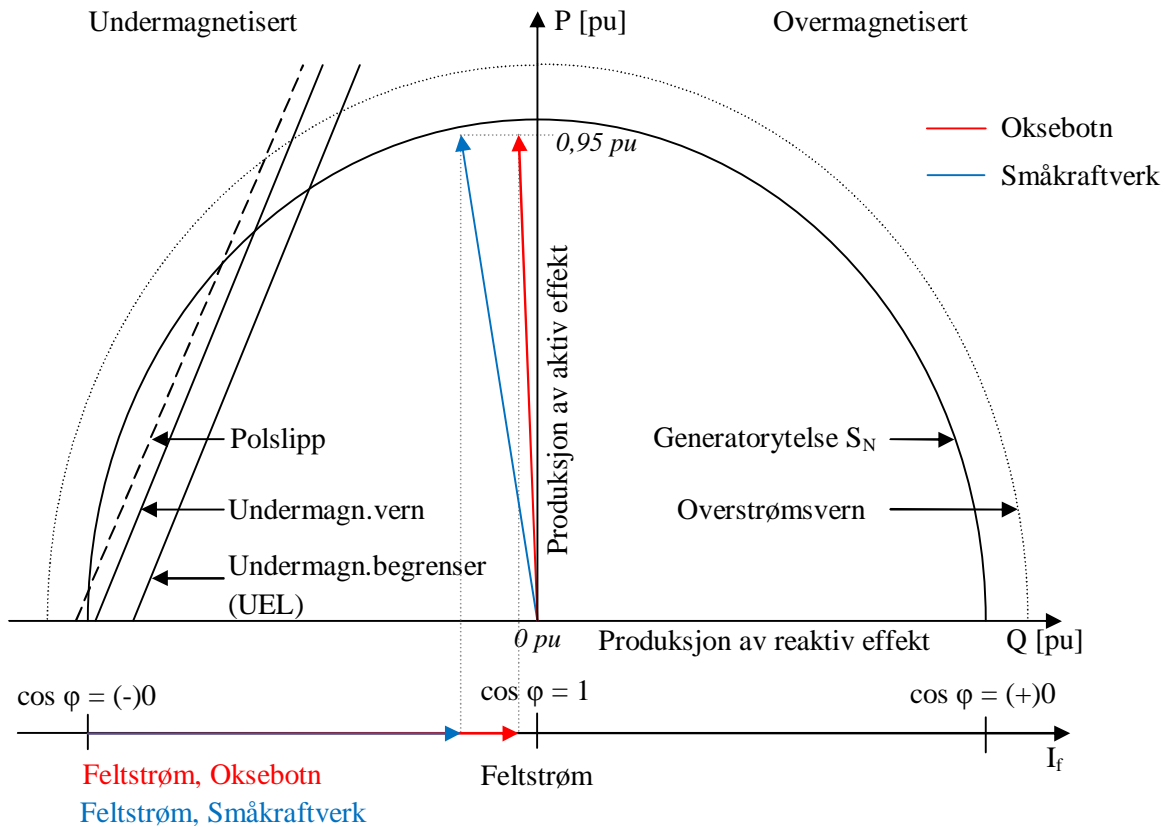
TABELL 5.7 RESULTAT FRA LASTFLYTANALYSE I MODELL MED KUN EKSISTERENDE GENERATORER.

	OKSEBOTN	VOSSADALSELVI	TVERRGJUVLO	FUREGARDANE	RASDALEN	GEITÅNI
P [kW]	1159	7427	5621	5215,5	5215,5	4876
Q [kVAr]	-889	-2440	-1845	-1710	-1710	-1597,6
cos $\phi$	-0,997	-0,95	-0,95	-0,95	-0,95	-0,955
U (22 kV)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Fra tabellen ser vi at alle småkraftverkene går med maksimal innstilt induktiv reaktiv effektproduksjon. Oksebotn har nesten effektfaktor lik 1 og trekker derfor ikke like mye reaktiv effekt.

Å ligge induktivt vil si at generatorene trekker reaktiv effekt fra nettet for å senke spenningen. Dette kan være forklaringen på at spenningen faller lavere utpå radialene enn i feilstedet, fordi generatorene ikke er hurtige nok å snu fra induktiv til kapasitiv drift. Å ligge undermagnetisert gjør generatorene mer utsatt for polslipp, som følge av svakere felt mellom stator og rotor. Dette er forsøkt illustrert i et driftsdiagram, hvor vi ser at småkraftverkene ligger nærmere polslipp enn Oksebotn.

## Modellering av kraftsystemet under Evanger



FIGUR 5.8 DRIFTSDIAGRAM.

### 5.5.2 Modell inkludert nye generatorer

Denne modellen skal bli brukt til å dimensjonere de nye generatorene. For å sikre at generatorene ikke blir feildimensjonert vil feilen bli kjørt når generatorene ligger mest utsatt før feil. I kapittel 4.4.2 ble det diskutert at generatorene var mer utsatte for feil hvis de lå alene i nettet. Det er derfor testet med en lastflytanalyse, hvor generatorene ligger både alene og med alle innkoblet (inkl. eksisterende). Resultatene er vist i tabellen under.

TABELL 5.8 SAMMENLIGNING AV RESULTATER FRA LASTFLYTANALYSE I MODELL MED NYE GENERATORER ALENE I NETTET OG MED ALLE KOBLET INN SAMTIDIG. P ER I [kW]. Q ER I [kVAr].

	ALENE I NETTET				ALLE GENERATORER I NETTET			
	P	Q	cos φ	U	P	Q	cos φ	U
Tverrelvi	4401	-1128	-0,969	100 %	4400	-161,9	~1	100 %
Togrovi	3299	-1139	-0,95	100 %	3300	1140	-0,95	100 %
Storelvi	3298	-1138	-0,95	100 %	3300	-1140	-0,95	100 %
Bjørndalen	2300	-553	-0,97	100 %	2300	5	~1	100 %
Hjørnevik	2499	-818,78	-0,95	100 %	2495	-335,5	~1	100 %

Resultatet viser driftsituasjonen blir verre ved å modellere generatorene alene i nettet. Dette vil derfor gjøres ved dimensjoneringen i kapittel 6.4. Feilen tunes på samme måte ved å legge inn overgangsmotstander. Dette må gjøres i hvert tilfelle.

# 6 DYNAMISK ANALYSE AV SMÅKRAFTPRODUKSJON I EVANGER

I dette kapittelet vil Voss-studien bli gjennomført. Først vil det eksisterende nettet rundt Evanger bli undersøkt. Denne delen av studien ble også utført i fordypningsprosjektet [1]. På grunn av noen endringer i modellen, tilbakemeldinger fra veiledere og FRT-studien er det valgt å gjøre alle simuleringer på nytt.

Videre vil det foreslås krav til reaktanser og svingmasse på de nye generatorene gjennom en iterasjonsprosess.

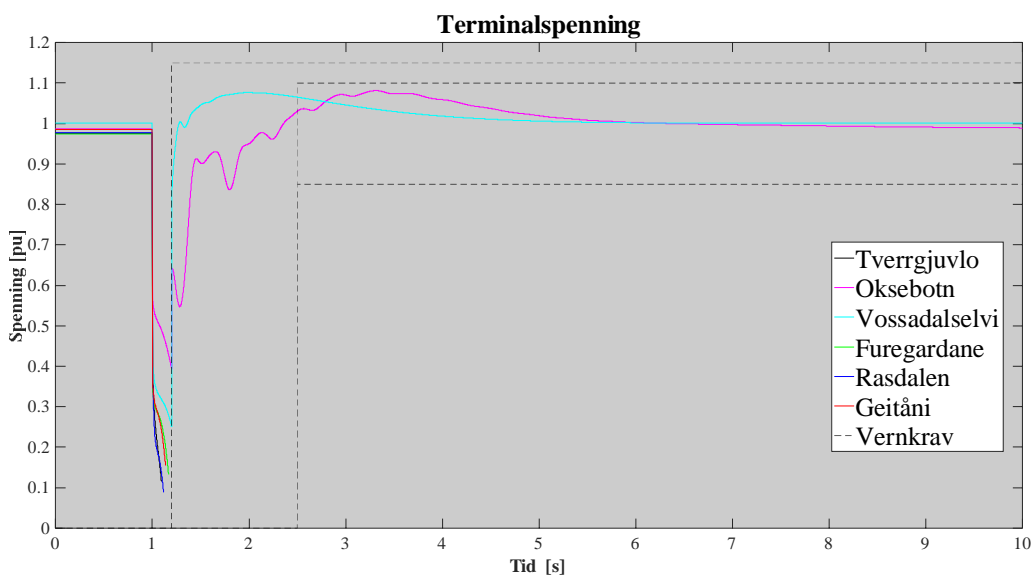
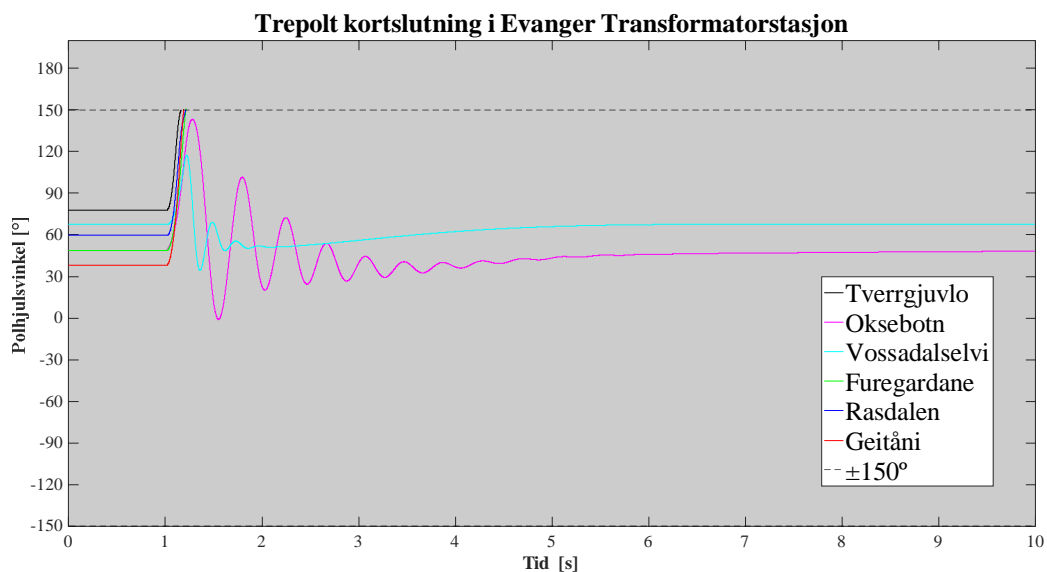
Utførelsen av denne studien er basert på diskusjoner i FRT-studien i kapittel 4, herunder valg av feilsituasjon og konservative forutsetninger. I tillegg vil noen vurderinger basere seg på FRT-studien og datainnsamlingen.

## 6.1 Generatorenes transiente stabilitet

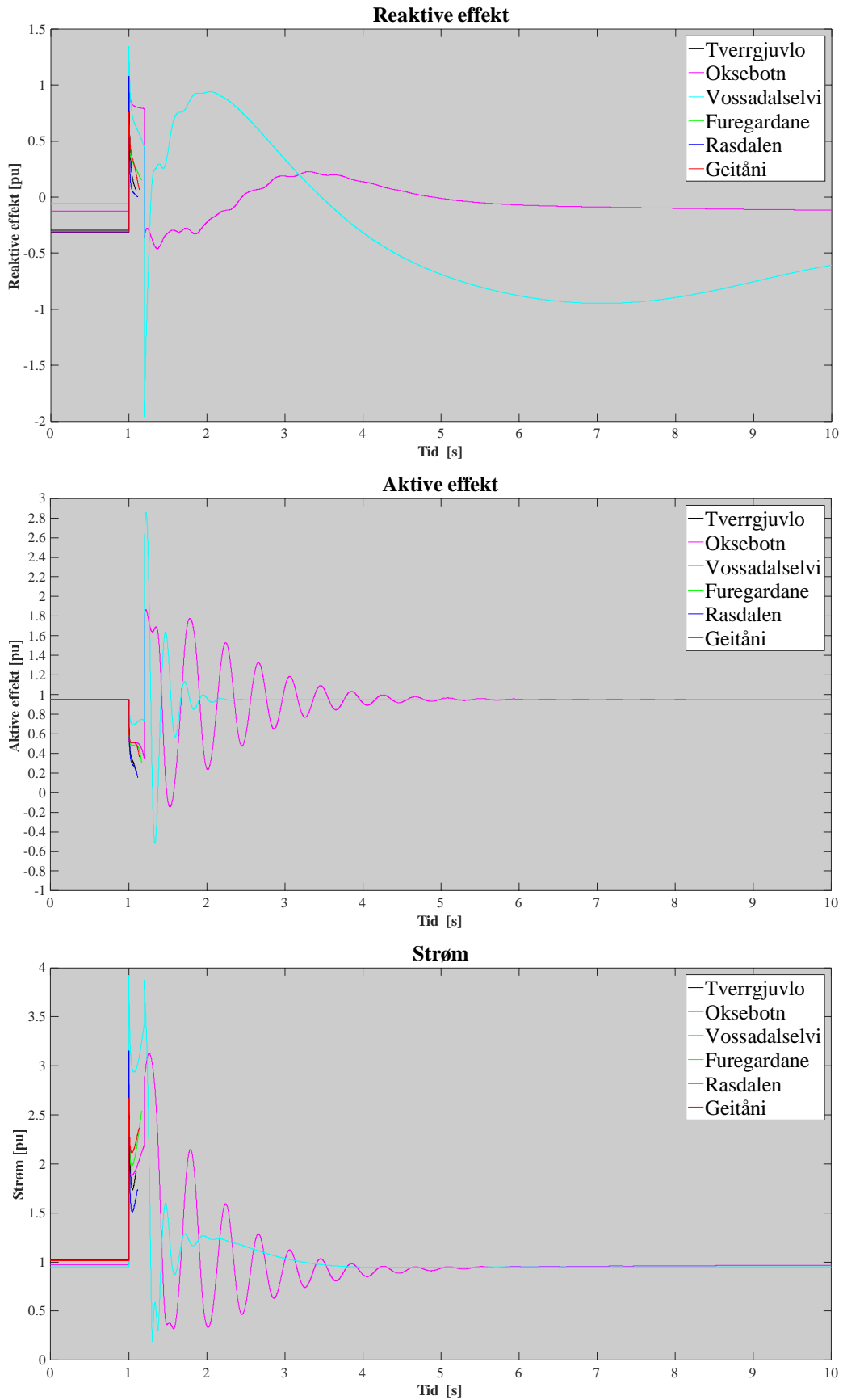
I kapittel 5.5 ble det gjennomført en lastflytanalyse. Denne beskriver situasjonen i nettet før feil. Resultatet viste at alle småkraftverkene trekker fullt reaktiv effekt. Dette viste seg å ha mye å si for stabiliteten i FRT-studien. Oksebotn ligger bedre an med en effektfaktor på nesten 1.

Som foreslått i FRT-studien er definisjonen på stabil enhet begrenset til  $\delta < 150^\circ$ . Generatoren legges derfor ut ved så høyt utsving. Simulering med dimensjonerende feil (20 % restspenning, 200 ms) er vist i under. Plot av polhjulsvinkelen til ustabile generatorer er vist frem til de når  $150^\circ$ . Dette på grunn av stående oscilleringer som gjør figuren utydelig.

Figurene er i vektorformat og optimalisert for PDF. Plottene for hver generator er vist i Vedlegg D.1



# Dynamisk analyse av småkraftproduksjon i Evanger



FIGUR 6.1 RESPONS TIL EKSITERENDE GENERATORER ETTER DIMENSJONERENDE FEIL I EVANGER TRANSFORMATORSTASJON.



## Dynamisk analyse av småkraftproduksjon i Evanger

Resultatene viser at Oksebotn og Vossadalselvi har gode dynamiske egenskaper. Innsvingningen av polhjulsvinkelen til Oksebotn er noe oscillerende, som kan tyde på at den er svakere stasjonært. Reaktiv effektproduksjonen bekrefter lastflytanalysen gjort tidligere, hvor vi ser at Oksebotn og Vossadalselvi ligger mindre induktivt enn de andre. Grunnen kan være at generatorene er større og ligger i områder i nettet med mindre spenningsdip. Dette ser vi på terminalspenningen. Spenningen holder seg innenfor kravene til vern satt av Sintef, se punkt 4 i kapittel 2.2.4.

Tverrgjuvlo, Furegardane og Rasdalen er ikke transient stabile i følge resultatene. Terminalspenningen faller lavere på disse generatorene enn i Oksebotn og Vossadalselvi, slik blir det vanskeligere å svinge seg inn til stabilt driftspunktet.

Videre undersøkes feilklareringstiden på disse generatorene. I tabellen oppgis både konservativ feilklareringstid ( $\delta = 150^\circ$ ) og tiden rett før generatoren falle ut av synkronisme. Dette for å se hvor konservativ dette kravet er. Voss Energi bør ta utgangspunkt i de konservative resultatene.

**TABELL 6.1 FEILKLARERINGSTIDEN TIL DE USTABILE SMÅKRAFTVERKENE.**

	FEILKLARERINGSTID	
	Konservativ ( $\delta = 150^\circ$ )	Faller ut av synkronisme
Tverrgjuvlo	93,8 ms	98,4 ms
Rasdalen	116,4 ms	116,4 ms
Furegardane	166 ms	170 ms
Geitåni	128,4 ms	128,4 ms

Resultatene viser at Tverrgjuvlo, Rasdalen og Geitåni faller hurtig ut av nettet. Voss Energi har informert om at det har vært flere episoder med utkobling i Rasdalen kraftstasjon. Dette gjenspeiler seg med resultatet. Furegardane holder seg lengre i nettet, men er ikke i henhold til dimensjonerende feil (200 ms).

En observasjon er at den konservative feilklareringstiden ikke er så fjern fra generatorene faller ut av nettet. Rasdalen og Geitåni lå med  $\delta < 150^\circ$  ved henholdsvis 116,3 ms og 128,3 ms. 0,1 ms senere var de begge ut av synkronisme. Grunnen til dette er at generatorene går fra en kritisk polhjulsinkel, som er mindre enn  $150^\circ$ , til ustabil. Derfor er ikke å definere generatorene som ustabile ved  $\delta > 150^\circ$  konservativt for disse to generatorene.

### 6.1.1 Vurdering av generatordata

For å vurdere generatordataene er det gjort en sammenligning med de 62 generatorene fra datainnsamlingen [18]. Dette er vist i tabellen under. Er de merket med rød farge betyr at de er dårligere stilt enn både medianen og gjennomsnittet. Blå farge betyr at de ligger imellom de to. Det er i tabellen lagt ved hvilke verdier av parametrene som gir god transient stabilitet. I tillegg beskrives påvirkningskraften parametrene har, både fra teorien i kapittel 3.3.2 og fra resultatet av FRT studiet.

TABELL 6.2 VURDERING AV PARAMETRENE TIL SMÅKRAFTVERKENE. BENEVNING TIL H ER WS/VA.

	H	$X_D$ [PU]	$X'_D$ [PU]	$X''_D$ [PU]	$X_Q$ [PU]	$X''_Q$ [PU]	$T'_D$ [S]	$T''_D$ [S]	$T''_Q$ [S]
Oksebotn	1,03	1,25	0,27	0,26	0,73	0,3	0,9	0,024	0,02
Vossadalselvi	0,752	1,502	0,234	0,165	0,769	0,154	0,489	0,012	0,02
Tverrgjuvlo	0,51	1,76	0,287	0,183	1,75	0,211	0,28	0,01	0,02
Furegardane	0,71	1,48	0,358	0,264	0,75	0,33	0,51	0,011	0,01
Rasdalen	0,69	2,3209	0,27858	0,172	2,2966	0,1948	0,2446	0,0615	0,0079
Geitåni	0,42	1,429	0,337	0,267	0,6	0,15	0,5	0,01	0,01
Median	0,58	1,58	0,25	0,16	1,01	0,19	0,41	0,018	0,003
Gjennomsnitt	0,78	1,78	0,25	0,16	1,14	0,21	0,43	0,026	0,052
Positiv påvirkning	Høy	Lav	Lav	Lav	Lav	Lav	Høy	Høy	Høy
Påvirkningskraft	Stor	Medium	Stor	Liten	Liten	Liten	Medium	Medium	Liten
(teori)									
Påvirkningskraft	Stor	Medium	Stor	Stor	Medium	Stor	Medium	Liten	Liten
(FRT-studie)									

Oksebotn og Vossadalselvi er bedre dimensjonert dynamisk enn de andre generatorene. De har høyere treghetskonstanter og lavere transient reaktans enn de andre generatorene. Disse parametrene har i følge teori og FRT-studien størst påvirkningskraft.

Tabellen viser at alle de ustabile generatorer er ikke er godt dimensjonert dynamisk i forhold til generatorer i datainnsamlingen. De har alle høye verdier på den transiente og subtransiente reaktansen sammenlignet med datainnsamlingen.

## 6.1.2 Tiltak til de ustabile småkraftverkene

Tiltak til de ustabile generatorene er vurdert med hensyn til de parametrene som, fra FRT-studien, har stor påvirkningskraft:

TABELL 6.3 PARAMETRE MED STOR PÅVIRKNINGSKRAFT PÅ GENERATORENES TRANSIENTE STABILITET.

	PARAMETER	PÅVIRKNINGSKRAFT (TEORI)	PÅVIRKNINGSKRAFT (RESULTAT)
Generator og AVR	Svingmasse J/H	Stor	<b>Stor</b>
	$x'_d$	Stor	<b>Stor</b>
	$x''_d$ og $x''_q$	Liten	<b>Stor</b>
Nettverk	Effektproduksjon før feil - P	Stor	<b>Stor</b>
	Effektproduksjon før feil - Q	Medium	<b>Stor</b>
	Nettets kortslutningsytelse	Stor	<b>Stor</b>

For å endre reaktanser må generatorene vikles om. Dette er en dyr prosess, da det kan føre til at generatorene vil være en stund ute av drift og derfor tape produksjonsinntekter. Nettets kortslutningsytelse kan føre til store endringer i nettet, og er derfor ikke aktuelt å se på.

I prosjektoppgaven ble det forsøkt å senke produksjonen på enheten. Etter tilbakemeldinger fra veiledere er dette tiltaket ikke vurdert i denne studien. Dette fører til tapt inntekt for småkraftverkeierne i flomperioder. Mulig tiltak fra tabellen er derfor å øke svingmassen og la generatorene gå mindre undermagnetisert enn de gjør. Sistnevnte bør kompenseres med styrbare reaktorer for å oppnå full spenningsregulering.

## 6.1.2.1 Økning av svingmasse på ustabile generatorer

TABELL 6.4 ØKING I SVINGMASSE PÅ USTABILE GENERATORER. J ER OPPGITT I [KGM<sup>2</sup>] OG H ER OPPGITT I [WS/VA].

	UTEN TILTAK			MED TILTAK		
	J	H	Feilklareringstid	J	H	Feilklareringstid
Tverrgjuvlo	552,5	0,51	93,8 ms	2350	2,18	200 ms
Furegardane	1262	0,71	116,4 ms	1730	0,97	200 ms
Rasdalen	1220	0,69	166 ms	3870	2,17	200 ms
Geitåni	1085	0,42	128,4 ms	2970	1,14	200 ms

Som beskrevet i kapittel 2.2.3 er det i følge Voith Hydro krevende å installere svinghjul hvis det er større enn naturlig svingmasse på generatoren. På alle generatorer bortsett fra Furegardane må treghetsmomentet mer dobles. Denne løsningen anbefales derfor ikke på disse enhetene. Furegardane kan oppnå transient stabilitet ved å installere svinghjul på minimum 468 kgm<sup>2</sup>.

## Dynamisk analyse av småkraftproduksjon i Evanger

### 6.1.2.2 Reduksjon av induktiv drift på ustabile generatorer

Generatorene ligger induktivt for å redusere spenningen. Som beskrevet i kapittel 5.5.1 vil dette føre at generatorene er mer utsatte for feil. I tabellen under er absorpsjonen av reaktiv effekt senket for å øke feilklareringstiden.

**TABELL 6.5 REDUKSJON AV INDUKTIV DRIFT PÅ USTABILE GENERATORER.**

		TVERRGJUVLO	FUREGARDANE	RASDALEN	GEITÅNI
Uten tiltak	Reaktiv effekt	-1750 kVAr	-1707 kVAr	-1708 kVAr	-1598 kVAr
	cos $\varphi$	-0,955	-0,95	-0,95	-0,95
	Feilklareringstid	93,8 ms	116,4 ms	166 ms	128,4 ms
	U (ref 22kV)	100 %	100 %	100 %	100 %
Med tiltak	Reaktiv effekt	0	-1059 kVAr	-233 kVAr	0
	cos $\varphi$	1	-0,98	-0,999	1
	Feilklareringstid	<b>128 ms</b>	~200 ms	~200 ms	<b>154 ms</b>
	U (ref 22kV)	100,05 %	102,3 %	102,5 %	103 %

Tverrgjuvlo og Geitåni vil ikke bli transient stabile, selv når de ikke trekker reaktiv effekt fra nettet. Furegardane og Rasdalen blir transient stabile hvis de trekker henholdsvis 1059 og 233 kVAr fra nettet. For å oppnå full spenningsregulering kan regulerbare reaktorer kobles i stasjonene. De må trekke henholdsvis 648 og 1475 kVAr for å oppnå 100 % systemspenning.

## 6.2 Generatorenes stasjonære stabilitet.

I henhold til Krav om stasjonær stabilitet fra REN [14] skal ikke generatorer med tilhørende utrustning bidra til ustabilitet i nettet. Alle elektromekaniske svingninger som kan oppstå som resultat av små forstyrrelser i nettet, skal være godt dempet og generatoren skal hurtig returnere til opprinnelig stabil driftstilstand. Slike forstyrrelser skjer jevnlig i nettet på grunn av normale driftsvariasjoner i last og produksjon. En forstyrrelse betraktes som liten dersom en linearisering av systemligningene er mulig for analyser. Dette ble beskrevet i kapittel 3.2.

Videre sier REN at dempningsforholdet  $|\zeta|$  skal være minst 5 %, se punkt 5 i kapittel 2.2.4.

Det er gjort en lineæranalyse med PSS®Netomac som regner ut systemets svingemoduser Sincal-modellen. Svingemodusen som er gjenkjent som generatorsvingningene til generatorene er vist i tabellen under.

**TABELL 6.6 RESULTATER FRA STASJONÆRANALYSEN I EKSISTERENDE NETT.**

MODI	FREKVENS [HZ]	REL. DEMPING [%]	GENERATOR
1	2,334	5,865	Oksebotn kr.st.
2	2.842	7.930	Furegardane kr.st.
3	4.241	6.308	Rasdalen kr.st.
4	4.218	10.819	Tverrgjuvlo kr.st.
5	3.585	21.299	Vossadalselvi kr.st.
6	4.115	18.939	Geitåni kr.st.

Oksebotn har noe lav demping. Et alternativ her er å installere en dempetilsats (PSS). En dempetilsats (PSS) sin innvirkning på stasjonære stabiliteten er diskutert i prosjektoppgaven. Det vil ikke videre bli diskutert her.

### 6.3 Prosess for dimensjonering av nye generatorer.

#### 6.3.1 Vurdering av parametre

Etter samtaler med Siemens PTI ble de nye generatorene modellert med et utgangspunkt som er vist i tabellen under. Dette er parametre som gir godt grunnlag for generatorens dynamiske stabilitet. De er også fornuftige med tanke på foreslåtte typiske generatordata fra datainnsamlingen. En sammenligning mellom generatorer fra datainnsamlingen, leverandør og foreslåtte parametre ligger i tabellen under. For å spare plass er tidskonstantene tatt ut av tabellen. Den transiente og de subtransiente tidskonstantene er henholdsvis satt til 0,3 s og 0,01 s.

TABELL 6.7 UTGANGSPUNKT VERDIER PÅ NYE GENERATORER.

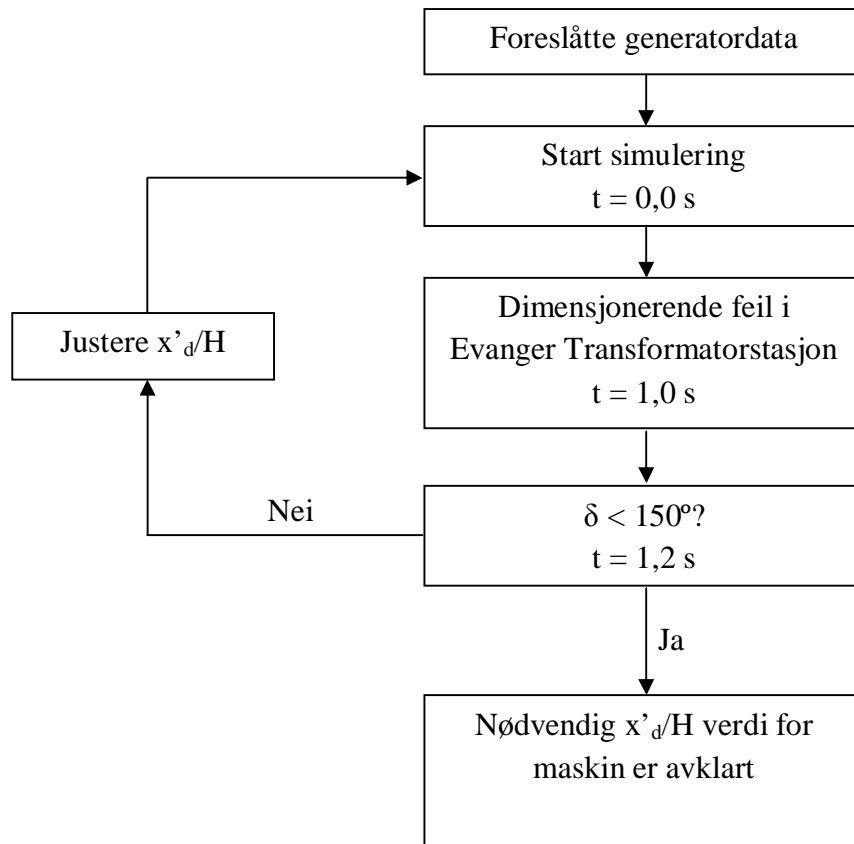
		H	$X_D$	$X'_D$	$X''_D$	$X_Q$	$X''_Q$
Tverrelvi	S = 4,89 MVA	0,4	1,5	0,2	0,2	1	0,3
Togrovi	S = 3,67 MVA	0,4	1,5	0,2	0,2	1	0,3
Storelvi	S = 3,67 MVA	0,4	1,5	0,2	0,2	1	0,3
Bjørndalen	S = 2,56 MVA	0,4	1,5	0,2	0,2	1	0,3
Hjørnevik	S = 2,78 MVA	0,4	1,5	0,2	0,2	1	0,3
Fra data-		Min	0,08	0,93	0,17	0,1	0,06
innsamlingen		Maks	3,93	3,73	0,38	0,26	2,52
		Median	0,58	1,58	0,25	0,16	1,01
		Gjennomsnitt	0,78	1,78	0,25	0,16	1,14
Fra Voith Hydro		Min	0,5	1	0,25	0,1	-
[10]		Maks	4	2,5	0,35	0,25	-
Positiv påvirkning		Høy	Lav	Lav	Lav	Lav	Lav
Påvirkningskraft (teori)		Stor	Medium	Stor	Liten	Liten	Liten
Påvirkningskraft (FRT-studie)		Stor	Medium	Stor	Stor	Medium	Stor

Svingmasse koster penger og kan medføre store utfordringer for generatorkonstruktørene. [10] Derfor settes den i utgangspunktet litt lavere enn gjennomsnittet og medianen. For å dimensjonere med tanke på kostnader, settes reaktansene konservative og svingmassen lav i utgangspunktet. Det viktig å nevne at lavere reaktanser øker også kostnaden fordi det betinger mer jern og kobber.[10]

Målet er å finne høyest mulig reaktans og lavest mulig svingmasse som oppfyller kravene til dynamisk stabil generator. Kravene innebærer dimensjonerende feil, som ble diskutert i kapittel 4.4.3.

### 6.3.2 Iterasjonsprosess

Det vil bli gjennomført en iterasjonsprosess hvor parametre justeres for å oppnå transient stabile generatorer. Det er valgt å justere parametrene med stor påvirkningskraft fra Tabell 6.7, altså den transiente reaktansen og svingmassen. Hvis kravene blir for strenge justeres reaktansen,  $x_d$ . Iterasjonsprosessen er vist i figuren under.



FIGUR 6.2 ITERASJONSPROSESS FOR DIMENSJONERING AV NYE GENERATORER.

## 6.4 Dimensjonering av nye generatorer

### 6.4.1 Tverrelvi kraftstasjon

Som beskrevet i kapittel 5.4 ligger småkraftverkene med full aktiv effektproduksjon. Generatoren ligger alene i nettet under feilsituasjonen, som det ble argumentert for ved modellering av feilen. Dette fører til at generatoren i Tverrelvi ligger med induktiv effektfaktor  $\cos \varphi = -0,969$  før feil.

TABELL 6.8 DIMENSJONERING AV TVERRELVI KRAFTSTASJON.

		TREGHETSKONSTANT H			
		0,4	0,6	0,8	1
Transient reaktans $x'_d$	0,2	170 ms	206,3 ms	237,5 ms	264 ms
	0,25	149 ms	175 ms	206,3 ms	231,3 ms
	0,3	137 ms	162,5 ms	187,5 ms	212,5 ms

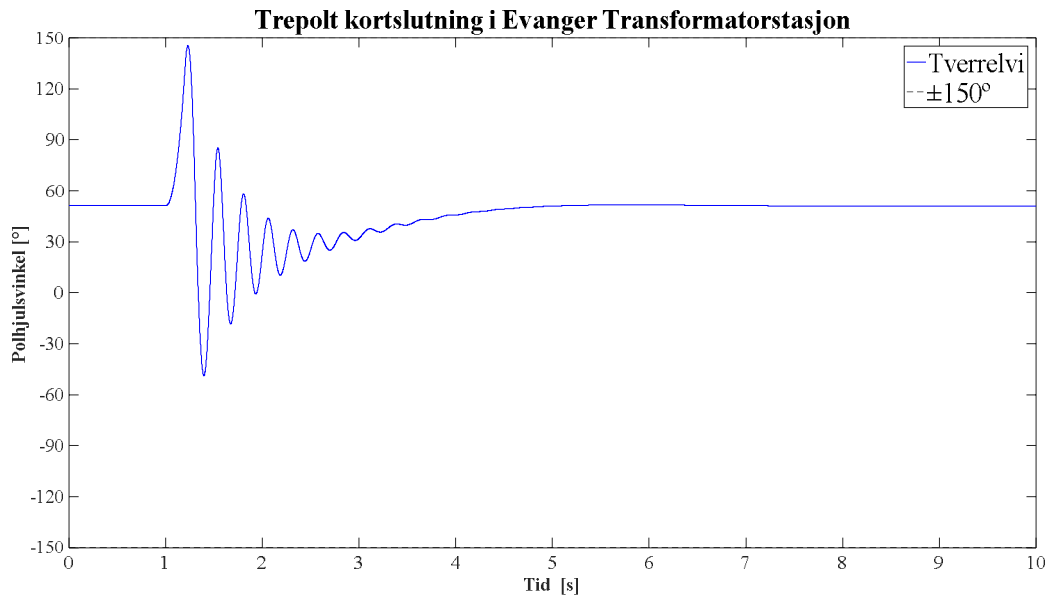


FIGURE 6.1 UTSVING TIL TVERRELVI MED  $H = 0,6$  WS/VA OG  $x'_d = 0,2$  PU VED DIMENSJONERENDE FEIL I EVANGER TR.ST.

Resultatene foreslår følgende krav til generatoren:

- $H \geq 0,6$  Ws/Va (tilsvarer  $J \geq 952$  kgm<sup>2</sup>)
- $x_d \leq 1,5$
- $x'_d \leq 0,2$
- $x''_d \leq 0,2$
- $x_q \leq 1$
- $x''_q \leq 0,3$



### 6.4.2 Togrovi kraftstasjon

Generatoren ligger alene i nettet under feilsituasjonen. Generatoren driftes med full aktiv effektproduksjon og induktiv  $\cos \varphi = -0,95$  før feilen inntreffer.

TABELL 6.9 DIMENSJONERING AV TOGROVI KRAFTSTASJON.

		TREGHETSKONSTANT H			
		0,6	0,8	1	1,2
Transient reaktans $x'_d$	0,2	168,8 ms	181,3 ms	200 ms	212,5 ms
	0,25	143,8 ms	162,5 ms	181,3 ms	193,8 ms
	0,3	137,5 ms	156,3 ms	168,8 ms	181,3 ms

Resultatene satt høyt krav til generatorens svingmasse. Det er derfor valgt å sette d-akse synkronreaktansen lavere til  $x_d = 1,2$ .

TABELL 6.10 ANDRE ITERASJONER MED  $x_d = 1,2$  - TOGROVI KRAFTSTASJON.

		TREGHETSKONSTANT H			
		0,6	0,8	1	1,2
Transient reaktans $x'_d$	0,2	181,3 ms	206,3 ms	225 ms	243,8 ms
	0,25	162,5 ms	187,5 ms	206,3 ms	225 ms
	0,3	150 ms	175 ms	193,8 ms	206,3 ms

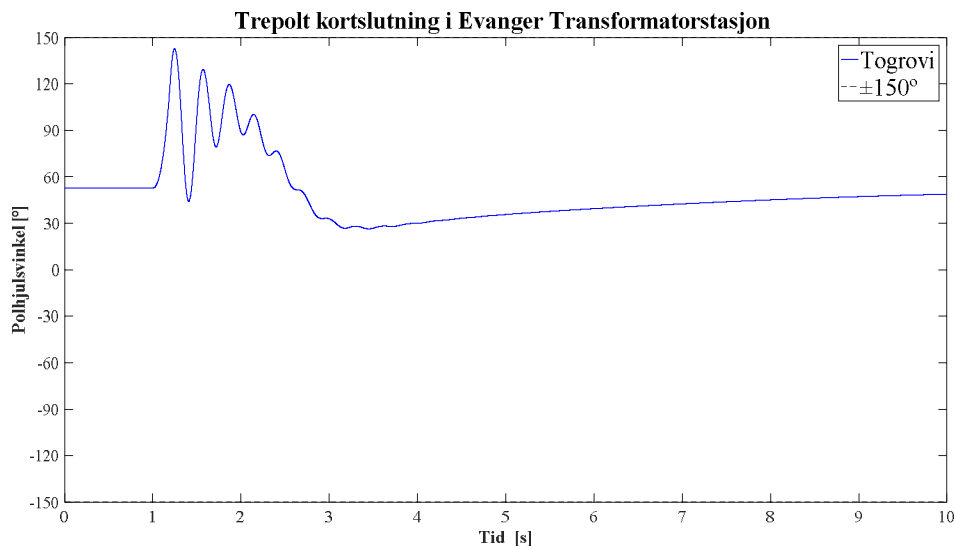


FIGURE 6.2 UTSVING TIL TVERRELVI MED  $H = 0,8$  WS/VA OG  $x'_d = 0,2$  PU VED DIMENSJONERENDE FEIL I EVANGER TR.ST.

Resultatene foreslår følgende krav til generatoren:

- $H \geq 0,8$  Ws/Va (tilsvarer  $J \geq 952$  kgm<sup>2</sup>)
- $x_d \leq 1,2$
- $x'_d \leq 0,2$
- $x''_d \leq 0,2$
- $x_q \leq 1$
- $x''_q \leq 0,3$

### 6.4.3 Storelvi kraftstasjon

Generatoren ligger alene i nettet under feilsituasjonen. Generatoren driftes med full aktiv effektproduksjon og induktiv  $\cos \varphi = -0,95$  før feilen inntreffer.

TABELL 6.11 DIMENSJONERING AV STORELV KRAFTSTASJON.

		TREGHETSKONSTANT H			
		0,1	0,2	0,4	0,6
Transient reaktans $x'_d$	0,2	181,3 ms	243,8 ms	375 ms	>375 ms
	0,25	118,8 ms	150 ms	206,3 ms	256,3 ms
	0,3	93,8 ms	125 ms	168,8 ms	206,3 ms

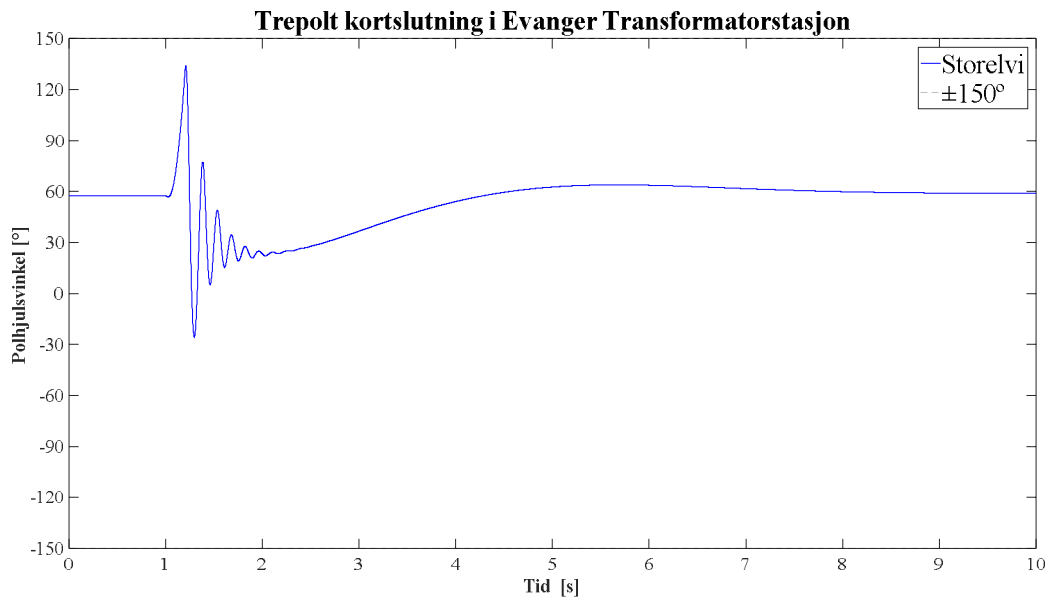


FIGURE 6.3 UTSVING TIL TVERRELVI MED  $H = 0,2 \text{ Ws/VA}$  OG  $x'_d = 0,2 \text{ PU}$  VED DIMENSJONERENDE FEIL I EVANGER TR.ST.

Resultatene foreslår følgende krav til generatoren:

- $H \geq 0,2 \text{ Ws/Va}$  (tilsvarer  $J \geq 238 \text{ kgm}^2$ )
- $x_d \leq 1,5$
- $x'_d \leq 0,2$
- $x''_d \leq 0,2$
- $x_q \leq 1$
- $x''_q \leq 0,3$

### 6.4.4 Bjørndalen kraftstasjon

Generatoren ligger alene i nettet under feilsituasjonen. Generatoren driftes med full aktiv effektproduksjon og induktiv  $\cos \varphi = -0,97$  før feilen inntreffer.

TABELL 6.12 DIMENSJONERING AV BJØRNDALEN KRAFTSTASJON.

		TREGHETSKONSTANT H		
		0,4	0,6	0,8
Transient reaktans $x'_d$	0,2	193,8 ms	231,3 ms	268,8 ms
	0,25	162,5 ms	193,8 ms	225 ms
	0,3	143,8 ms	175 ms	206,3 ms

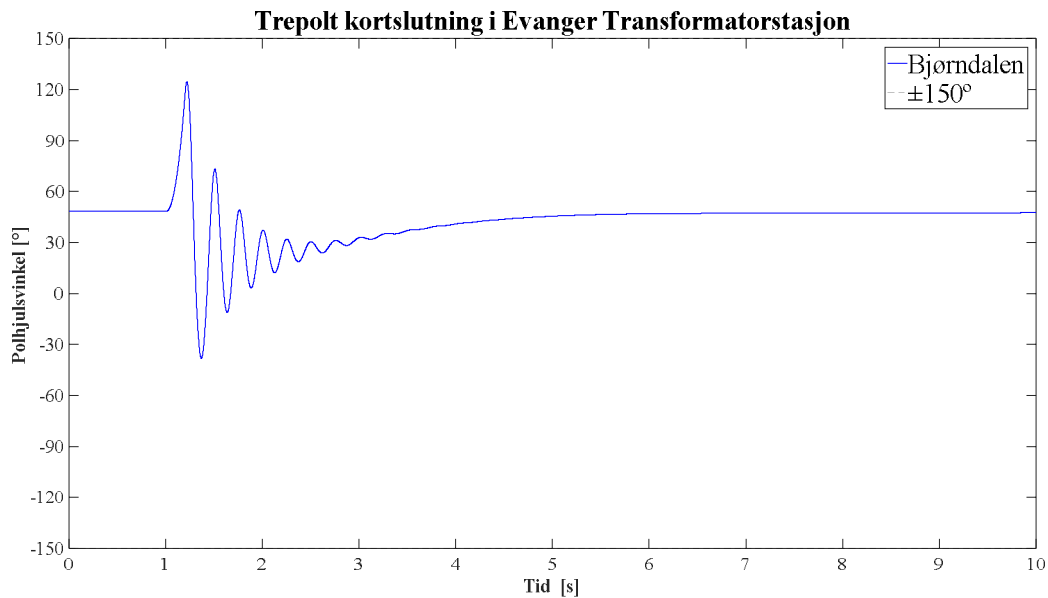


FIGURE 6.4 UTSVING TIL TVERRELVI MED  $H = 0,6$  Ws/VA OG  $x'_d = 0,2$  PU VED DIMENSJONERENDE FEIL I EVANGER TR.ST.

Resultatene foreslår følgende krav til generatoren:

- $H \geq 0,6$  Ws/Va (tilsvarer  $J \geq 497$  kgm<sup>2</sup>)
- $x_d \leq 1,5$
- $x'_d \leq 0,2$
- $x''_d \leq 0,2$
- $x_q \leq 1$
- $x''_q \leq 0,3$

### 6.4.5 Hjørnevik kraftstasjon

Generatoren ligger alene i nettet under feilsituasjonen. Generatoren driftes med full aktiv effektproduksjon og induktiv  $\cos \varphi = -0,95$  før feilen inntreffer.

TABELL 6.13 DIMENSJONERING AV HJØRNEVIK KRAFTSTASJON.

		TREGHETSKONSTANT H			
		0,2	0,4	0,6	0,8
Transient reaktans $x'_d$	0,2	162,5 ms	225 ms	268,8 ms	312,5 ms
	0,25	131,3 ms	175 ms	212,5 ms	250 ms
	0,3	112,5 ms	156,3 ms	187,5 ms	218,8 ms

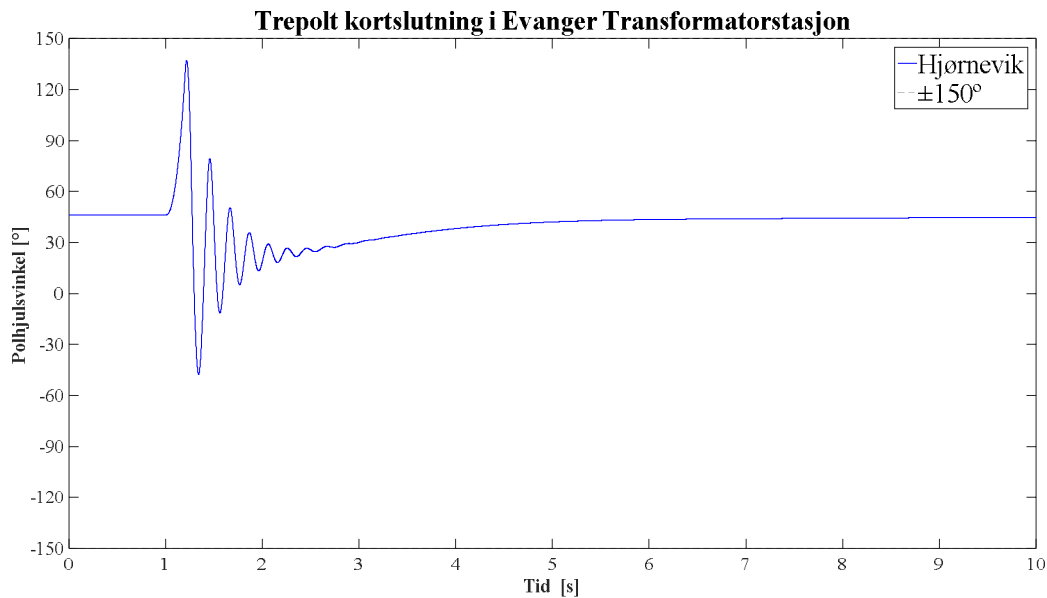


FIGURE 6.5 UTSVING TIL TVERRELVI MED  $H = 0,4$  Ws/VA OG  $x'_d = 0,2$  PU VED DIMENSJONERENDE FEIL I EVANGER TR.ST.

Resultatene foreslår følgende krav til generatoren:

- $H \geq 0,4$  Ws/VA (tilsvarer  $J \geq 360$  kgm<sup>2</sup>)
- $x_d \leq 1,5$
- $x'_d \leq 0,2$
- $x''_d \leq 0,2$
- $x_q \leq 1$
- $x''_q \leq 0,3$

## 6.5 Generatorenes påvirkning på eksisterende nett

Figurene under viser både nye og eksisterende småkraftverk koblet i nettet. Tabell 6.14 viser feilklareringstiden på de ustabile generatorene. Dette for å se påvirkningene de nye kraftverkene har. De nye generatorene er modellert til å ligge på kravene foreslått i kapittel 6.4. En oversikt ligger i Vedlegg E.1. Stasjonære beregninger (egenverdier) er lagt ved i Vedlegg E.3.

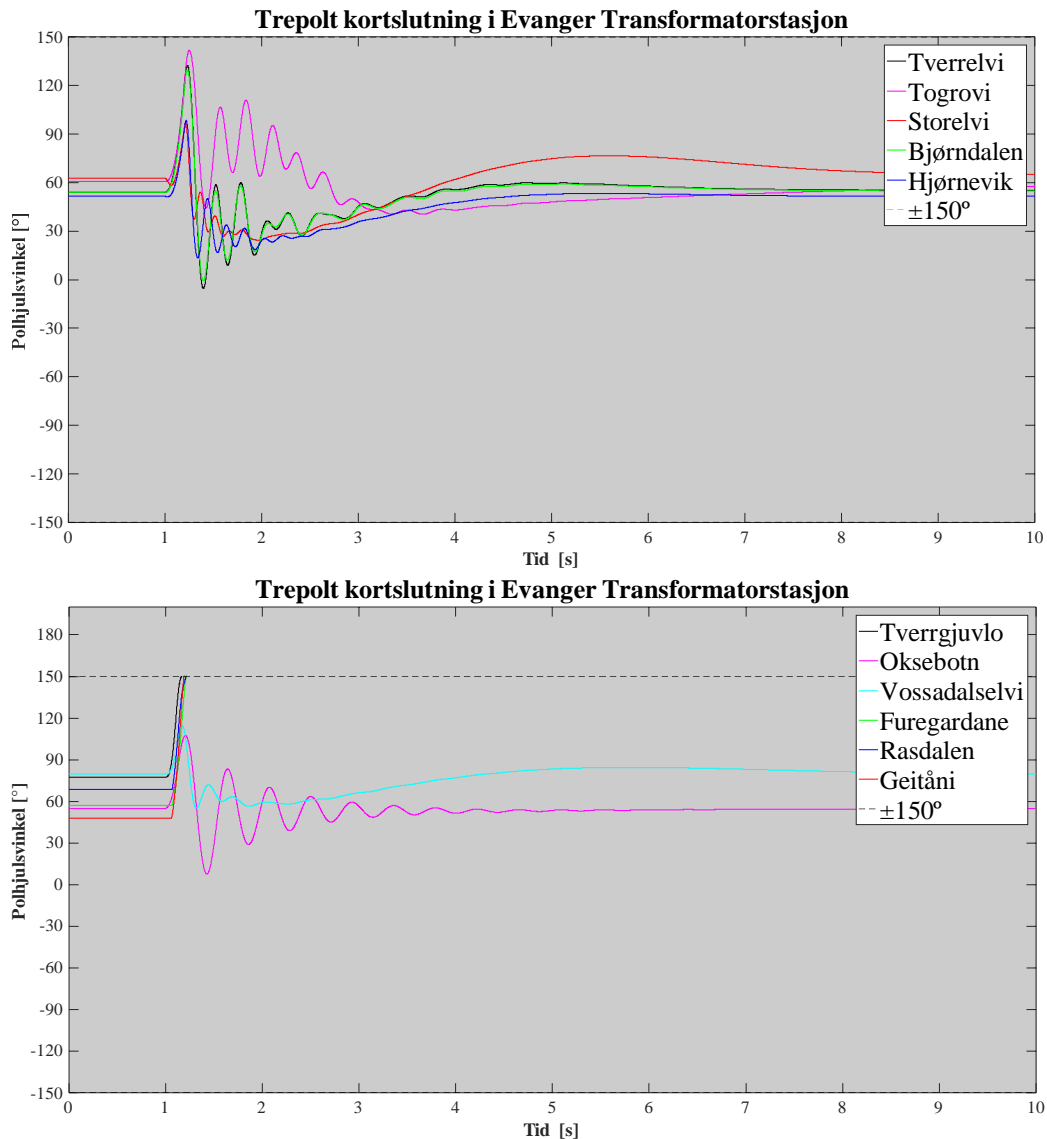


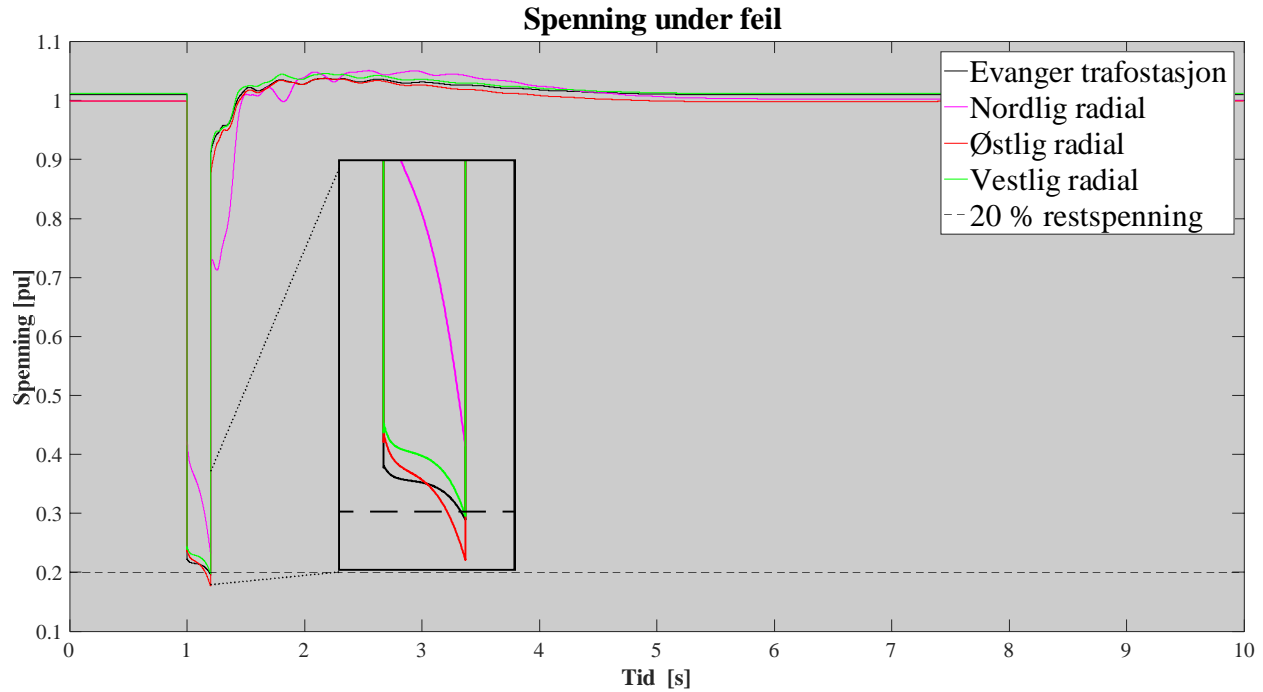
FIGURE 6.6 UTSVING MED ALLE GENERATORENE LIGGENDE INNE.

TABELL 6.14 FEILKLARERINGSTID PÅ USTABILE GENERATORER, MED OG UTEN NY PRODUKSJON.

	FEILKLARERINGSTID	
	Kun eksisterende	Inkl. nye generatorer
Tverrgjuvlo	98,4 ms	135 ms
Rasdalen	116,4 ms	124 ms
Furegardane	170 ms	182 ms
Geitåni	128,4 ms	138 ms

## Dynamisk analyse av småkraftproduksjon i Evanger

Samtlige generatorer ser ut til å få bedre respons når alle generatorene er koblet til nettet. Dette kan skyldes at spenningsdippen, utover radialene, har økt med den nye produksjonen. Figuren under viser spenningene ut på radialene ved dimensjonerende feil i Evanger transformatorstasjon. Tabell 6.15 sammenligner spenningsdippen med og uten den nye produksjonen. Spenningsdippen ved eksisterende nett er vist i kapittel 5.5.1.



**FIGUR 6.3 SPENNINGS DIP PÅ RADIALENE MED DIMENSJONERENDE FEIL I EVANGER TRAFOSTASJON.**

**TABELL 6.15 SAMMENLIGNING MELLOM SPENNINGS DIP PÅ RADIALENE MED OG UTEN NY PRODUKSJON.**

	RESTSPENNING	
	Eksisterende nett	Inkludert ny produksjon
Evanger trafostasjon	20,06 %	19,95 %
Nordlig radial	14,95 %	23,20 %
Østlig radial	15,48 %	17,62 %
Vestlig radial	12,16 %	19,77 %

## 6.6 Konklusjon

### 6.6.1 Eksisterende nett

I dette kapittelet er stabiliteten til de eksisterende generatorene (inkl. Geitåni) tilkoblet distribusjonsnettet under Evanger transformatorstasjon undersøkt.

Simuleringene viste at kun to av generatorene er å anse som dynamisk stabil ut ifra forutsetninger som er satt. Dette var Vossadalselvi og Oksebotn kraftstasjon. Oksebotn ligger mindre induktivt enn de andre generatorene. Dette kan skyldes at den har høyere ytelse og derfor produserer nok reaktiv effekt selv med høyere effektfaktor. Den ligger også alene et stykke ut på radialen.

Terminalspenningen til Oksebotn og Vossadalselvi når en restspenning på henholdsvis 39,6 % og 25 %, hvor de andre generatorene faller lavere enn i feilstedet. Begge generatorene har bedre transient reaktans og høyere treghetskonstant enn datainnsamlingen, som i følge både FRT-studien og teorien i kapittel 3.3.2 har stor påvirkning på stabiliteten.

Oksebotn sin respons er noe oscillerende. Dette bekreftes i stasjonæranalysen hvor dempingen er lav. Den er likevel innenfor kravene til REN. Et tiltak som kan forbedre responsen er å legge inn en dempetilsats. Dette ble diskutert i prosjektoppgaven [1].

Tverrgjuvlo, Rasdalen, Furegardane og Geitåni kraftstasjon har ikke FRT-egenskapene til å overleve den dimensjonerende feilen. Tiltak diskutert viser at Rasdalen og Furegardane vil holde seg synkronisert med nettet hvis generatorene trekker mindre reaktiv effekt. Et alternativ her er å installere styrbare reaktorer i stasjonene for å oppnå 100 % systemspenning. Furegardane vil også oppfylle kravene ved å øke svingmassen tilsvarende 468 kgm<sup>2</sup>. Tverrgjuvlo og Geitåni anbefales momentant utkobling ved alvorlige feil.

### 6.6.2 Nye generatorer

Det er også blitt foreslått krav til reaktanser og svingmasse på de nye generatorene, Tverrelvi, Togrovi, Storelvi, Bjørndalen og Hjørnevik. Generatorparametrene vil oppfylle krav til transient stabilitet. Det kommer også frem av simuleringene at den nye produksjonen vil redusere fallet i spenningen utover radialene under dimensjonerende feil i Evanger trafostasjon. Dette øker feilklareringstiden til de ustabile generatorene og reduserer utsvinget til Vossadalselvi og Oksebotn. Den nye produksjon vil altså ha positiv effekt på systemstabiliteten.

## 6.7 Videre arbeid

Ved utbygging av de nye kraftstasjonene anbefales en gjennomgang av reléplaner for å sikre selektiviteten i nettet og for å hindre utilsiktede utkoblinger når effektflyten øker. Når generatorene idriftsettes bør vernfunksjoner og regulatorparametere gjennomgås for å avklare at de tilfredsstillende krav som er stilt av nettselskapet.

# 7 DISKUSJON OG KONKLUSJON

Dette kapittelet vil oppsummere arbeidet som er gjort. Det vil bli diskutert resultater, observasjoner og påstander som er gjort i FRT-studien og sammenlignet dem med nettanalysen, Voss-studien. Detaljerte konklusjoner ligger i kapittel 4.4 for FRT-studien og kapittel 6.6 for Voss-studien.

## 7.1 Hva er gjort?

I denne masteroppgaven er det sett på FRT-egenskapene til småkraftverk. Det er blitt gjennomført en datainnsamling av 62 generatorer. 20 av disse ble brukt i et tobussystem for å undersøke hvor lenge de holder seg i synkronisme ved forskjellige spenningsdip. Videre ble påvirkningskraften til ulike parametre undersøkt på tre av disse generatorene. Dette for å kartlegge hvordan usikkerheter i slike parametre vil påvirke nettanalyser. Det ble også diskutert hvordan forutsetninger kan legges inn for å unngå feildimensjonering.

Med utgangspunkt i dette ble den dynamiske nettanalysen til Voss Energi gjennomført. Analysen kartla de dynamiske egenskapene til generatorer som i dag er tilknyttet nettet. I tillegg ble det satt krav til reaktanser og svingmasser på nye produksjonsenheter som venter konsesjonsbehandling.



## 7.2 Diskusjon av resultater

Datainnsamlingen ga et bilde på typiske parameterverdier på generatorer i småkraftverk. Datainnsamlingen er overlevert til instituttet, slik at det kan bli brukt videre i andre sammenhenger.

Resultatene fra de 20 generatorene i tobussystemet viste at mange av generatorene holdt lenge med lave restspenninger. Feilsituasjonen som ble valgt som dimensjonerende hadde 20 % restspenning og varighet 200 ms. Denne feilen ble videre brukt i Voss-studien til å kartlegge den transiente stabiliteten til eksisterende generatorer i nettet og ved dimensjonering av nye generatorer.

Fire av generatorene i nettet tålte ikke en slik spenningsdipp på naboavgang. Situasjonen i nettet førte til at det oppsto høyere fall i terminalspenningen til de ustabile generatorene enn i feilstedet. Dette antas å ha en sammenheng med at generatorene driftes maksimalt induktiv, i henhold til grenser som er satt. Videre ble de dynamiske parametrene sammenlignet med datainnsamlingen, som viste at de ustabile generatorene var svakere dynamisk dimensjonert enn gjennomsnittet og medianen.

Resultat fra FRT-studien viste påvirkningskraften til ulike parametre. Parametre med stor påvirkningskraft kan gi usikkerheter i nettanalyser. En av dem er kortslutningsytelsen til matende nett. I Voss-studien ble den beregnet av BKK, basert på deres nettmodell av sitt nett. Det er derfor vanskelig å vurdere disse tallene, noe som påvirker usikkerheten i nettanalysen.

Det er alltid tryggere å overdimensjonere generatorer. Derfor er det diskutert forutsetninger som kan sikre at ikke usikkerhetsfaktorer, slik som kortslutningsytelse, vil føre til feildimensjonering. En av dem var å definere generatorene som ustabil ved utsving lik  $150^\circ$ . Dette viste seg å ha lite effekt i Voss-studien fordi flere av generatorene faller ut av nettet med mindre utsving. Et annet alternativ, som kan ha mer effekt, er å legge inn litt lavere feilklareringstid enn det utregnede, f.eks. 90-95 %.

Produksjonen av aktiv og reaktiv effekt før feil hadde mye å si for generatorenes transiente stabilitet. Produksjon av aktiv effekt ble kun utført i prosjektoppgaven [1]. Produksjon av reaktiv effekt er styrt av spenningsreguleringen. Dette gjør at generatorer i områder med høy spenning er mer utsatt for å bli ustabile, fordi de driftes undermagnetisert. Dette konkluderte både FRT-studien og Voss-studien. I Voss-studien ble dette diskutert under vurdering av tiltak for de ustabile generatorene.

Hvor induktive generatorene ligger før feil, viste seg å være påvirket av hvor mange generatorer som var koblet inn samtidig i nettet. Det å la de nye generatorene ligge alene i nettet, var derfor et vellykket tiltak for å gjøre analysen mer konservativ. Det gjorde også dimensjoneringen av nye generatorer mye enklere, fordi man slipper å justere reaktansene på alle generatorer samtidig.

### 7.3 Helhetlig vurdering og konklusjon

I denne oppgaven er det beskrevet hvilke usikkerhetsfaktorer som kan oppstå i dynamiske analyser. Konsekvensene av slike faktorer kan føre til feildimensjonering av generatorer, slik at uforutsette utkoblinger oppstår.

Usikkerheten i en nettanalyse avhenger av påvirkningskraften parameteren har på generatorens transiente stabilitet. Av de parametrene som i FRT-studien ble undersøkt, er følgende mest kritiske i simuleringer:

- Svingmasse, transiente og subtransiente reaktanser
- Produksjon av aktiv og reaktiv effekt
- Sterkt eller svakt matende nett (kortslutingsytelse)

Unøyaktige datainnhentinger av slike parametre kan i verste fall føre til en for snill nettanalyse og feildimensjonering av generatorer. Det legges derfor inn konservative forutsetninger i studien. De forutsetninger som gjennom Voss-studien viste seg å ha god effekt er:

- Feil med 20 % restspenning og varighet 200 ms på naboavgang.
- Å la generatorer ligge alene i nettet under dimensjonering. Dette gjør også simuleringene mindre tidkrevende.
- Full produksjon av aktiv effekt.

Legges disse forutsetningene inn vil risiko for feildimensjonering reduseres.

# 8 REFERANSER

1. Haukaas, V., *Dynamisk analyse av småkraftproduksjon*. 2016.
2. Olje- og energidepartementet. Available from: <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/fornybar-energi/norsk-vannkraftshistorie-pa-fem-minutter/id2346106>.
3. Astrid Petterteig, O.M., Thor Henriksen, and Ø. Håland, *Tekniske retningslinjer for tilknytning av produksjonsenheter, med maksimum aktiv effektproduksjon mindre enn 10 MW, til distribusjonsnettet*. 2006.
4. NVE. Available from: <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/vannkraft/sma-kraftverk>.
5. Thema, *Veileder for betinget tilknytningsplikt for ny kraftproduksjon*. 2015.
6. Høyte, F. *Dempevikling*. 2009 [cited 2016 5. oktober]; Available from: <https://snl.no/dempevikling>.
7. emadrlc. Available from: <http://emadrlc.blogspot.no/2013/01/chapter-2-ac-generators.html>.
8. Machowski, J., J. Bialek, and J. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*. 2008: Wiley.
9. Statnett, *Funksjonskrav i kraftsystemet (FIKS)*. 2012.
10. Voith Hydro AS, *Kurs: Generatorer i praksis*. 2013: Trondheim.
11. Wildi, T., *Electrical Machines, Drives and Power Systems (Internal Edition)*. 2014: Pearson Education Limited.
12. Chapman, S.J., *Electric Machinery Fundamentals. Fourth Edition*. 2005.
13. Voith Hydro AS, *Kurs: Turbiner og denslags*. 2013: Trondheim.
14. REN, *Vedlegg 3: Teknisk funksjonskrav til tilknytnings- og nettleieavtale for innmatingskunder i distribusjonsnettet*.
15. Kundur, P., *Power System Stability And Control*. 1994: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited.
16. Pal, B. and B. Chaudhuri, *Robust Control in Power Systems*. 2006: Springer US.
17. Tran-Quoc, T., et al. *Stability Analysis for the Distribution Networks with Distributed Generation*. in *2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. 2006.
18. Haukaas, V., *Generatordata småkraft - Vebjørn Haukaas 2017*. 2017.
19. Kirkeby, H.H., Øivind, *Testing av småkraftverks FRT-egenskaper*. 2017.
20. Cascade. Available from: <http://www.cascade.no/tjenester.php>.
21. IEC, *Technical report: 60909-1 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Second edition*. 2002.

## Referanser

22. Nexans, *Kabelboka: Håndbok for e-verkskabler*.
23. *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992), 2006: p. 1-93.
24. Nissei Corporation. Available from: [http://www.nissei-gtr.co.jp/english/gtr/pdf/mini\\_e07.pdf](http://www.nissei-gtr.co.jp/english/gtr/pdf/mini_e07.pdf).

# 9 VEDLEGG

<b>VEDLEGG A</b>	<b>TEORI .....</b>	<b>93</b>
	VEDLEGG A.1 STATISTIKK OVER SPENNINGSDIPP.....	93
<b>VEDLEGG B</b>	<b>MODELLERING.....</b>	<b>94</b>
	VEDLEGG B.1 SIMULERINGSMODELL I PSS®SINCAL.....	94
	VEDLEGG B.2 KORTSLUTNINGSBEREGNINGER PÅ EVANGER 132 kV SAMLESKINNE.....	94
<b>VEDLEGG C</b>	<b>REGULATORINNSTILLINGER.....</b>	<b>95</b>
	VEDLEGG C.1 HYGOV.....	95
	<i>Vedlegg C.1.1 Blokkdiagram .....</i>	<i>95</i>
	<i>Vedlegg C.1.2 Regulatorverdier.....</i>	<i>95</i>
	VEDLEGG C.2 AC8B .....	96
	<i>Vedlegg C.2.1 Blokkskjema.....</i>	<i>96</i>
	<i>Vedlegg C.2.2 Standardverdier.....</i>	<i>96</i>
	<i>Vedlegg C.2.3 Tuning av Oksebotn.....</i>	<i>97</i>
	<i>Vedlegg C.2.4 Tuning av Vossadalselvi .....</i>	<i>98</i>
	<i>Vedlegg C.2.5 Tuning av Tverrgjuvlo .....</i>	<i>99</i>
	<i>Vedlegg C.2.6 Tuning av Rasdalen .....</i>	<i>100</i>
	<i>Vedlegg C.2.7 Tuning av Furegardane .....</i>	<i>101</i>
	<i>Vedlegg C.2.8 Tuning av Geitåni.....</i>	<i>102</i>
	<i>Vedlegg C.2.9 Tuning av Tverrelvi .....</i>	<i>103</i>
	<i>Vedlegg C.2.10 Tuning av Togrovi .....</i>	<i>104</i>

## Vedlegg

<i>Vedlegg C.2.11</i>	<i>Tuning av Storelvi</i> .....	105
<i>Vedlegg C.2.12</i>	<i>Tuning av Bjørndalen</i> .....	106
<i>Vedlegg C.2.13</i>	<i>Tuning av Hjørnevik</i> .....	107
<b>VEDLEGG D</b>	<b>RESULTATER FRA STUDIER I EKSISTERENDE NETT</b> .....	<b>108</b>
VEDLEGG D.1	RESULTATER FRA DEN TRANSIENTE ANALYSEN .....	108
<i>Vedlegg D.1.1</i>	<i>Oksebotn kraftstasjon</i> .....	108
<i>Vedlegg D.1.2</i>	<i>Vossadalselvi kraftstasjon</i> .....	110
<i>Vedlegg D.1.3</i>	<i>Tverrgjuvlo kraftstasjon</i> .....	112
<i>Vedlegg D.1.4</i>	<i>Rasdalen kraftstasjon</i> .....	114
<i>Vedlegg D.1.5</i>	<i>Furegardane kraftstasjon</i> .....	116
<i>Vedlegg D.1.6</i>	<i>Geitåni kraftstasjon</i> .....	118
VEDLEGG D.2	RESULTAT FRA DEN STASJONÆRE ANALYSEN .....	120
<i>Vedlegg D.2.1</i>	<i>Egenverdier til eksisterende generatorer</i> .....	120
<b>VEDLEGG E</b>	<b>RESULTATER FRA STUDIER AV NYE GENERATORER</b> .....	<b>121</b>
VEDLEGG E.1	PARAMETRE PÅ NYE GENERATORER .....	121
VEDLEGG E.2	RESULTATER FRA DEN TRANSIENTE ANALYSEN .....	122
<i>Vedlegg E.2.1</i>	<i>Tverrelvi kraftstasjon</i> .....	122
<i>Vedlegg E.2.2</i>	<i>Togrovi kraftstasjon</i> .....	124
<i>Vedlegg E.2.3</i>	<i>Storelvi kraftstasjon</i> .....	126
<i>Vedlegg E.2.4</i>	<i>Bjørndalen kraftstasjon</i> .....	128
<i>Vedlegg E.2.5</i>	<i>Hjørnevik kraftstasjon</i> .....	130
VEDLEGG E.3	RESULTAT FRA DEN STASJONÆRE ANALYSEN .....	132
<i>Vedlegg E.3.1</i>	<i>Egenverdier til eksisterende generatorer</i> .....	132
<b>VEDLEGG F</b>	<b>UTREGNING AV TREGHETSMOMENT FOR OKSEBOTN OG TVERRGJUVLO</b> .....	<b>133</b>
VEDLEGG F.1	UTLEDNINGER AV GD2 .....	133
VEDLEGG F.2	UTREGNING AV TREGHET TIL TVERRGJUVLO OG OKSEBOTN .....	134

## Vedlegg A TEORI

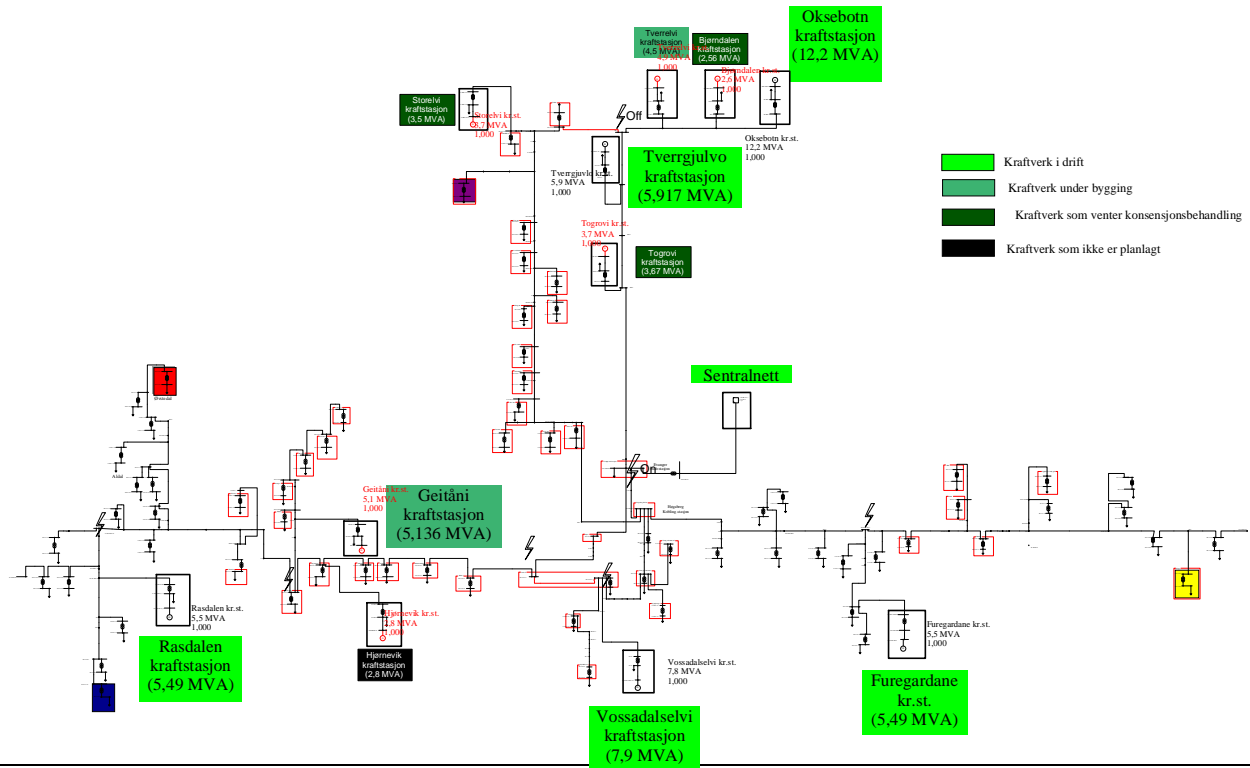
## Vedlegg A.1 STATISTIKK OVER SPENNINGSDIPP

Gjennomsnittlig antall spenningsdipp per målepunktår er hentet fra [19]:

U [%]	VARIGHET					
	0,02 – 0,1 s	0,1 – 0,5 s	0,5 – 1 s	1 – 3 s	3 – 20 s	20 – 60 s
90 – 85 %	13	9	3	1	0	0
85 – 70 %	5	2	1	0	0	0
70 – 40 %	7	2	0	0	0	0
40 – 1 %	4	0	0	0	0	0
1 – 0 %	1	2	1	0	0	4

# Vedlegg B MODELLERING

## Vedlegg B.1 SIMULERINGSMODELL I PSS®SINCAL



## Vedlegg B.2 KORTSLUTNINGSBEREGNINGER PÅ EVANGER 132 KV SAMLESKINNE

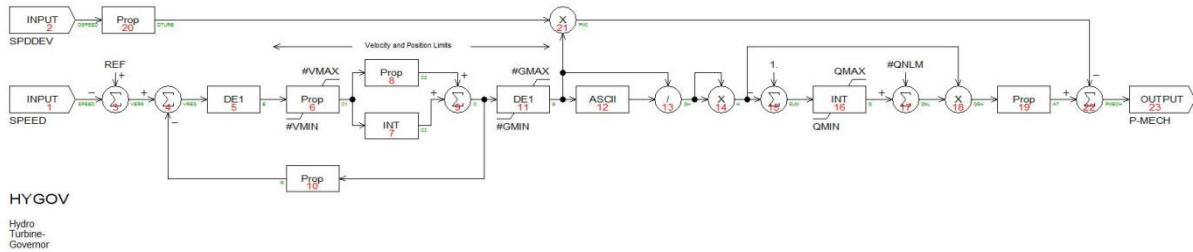
	$I'_{K}$ (kA)	$S'_{K}$ (MVA)	R/X
Maks	5,8	1356	0,065
Min (Normalforsyning fra 300 kV)	4,3	1005	0,048
Min (Reserve fra Dale)	0,4	94	0,295



# Vedlegg C REGULATORINNSTILLINGER

## Vedlegg C.1 HYGOV

### Vedlegg C.1.1 BLOKKDIAGRAM

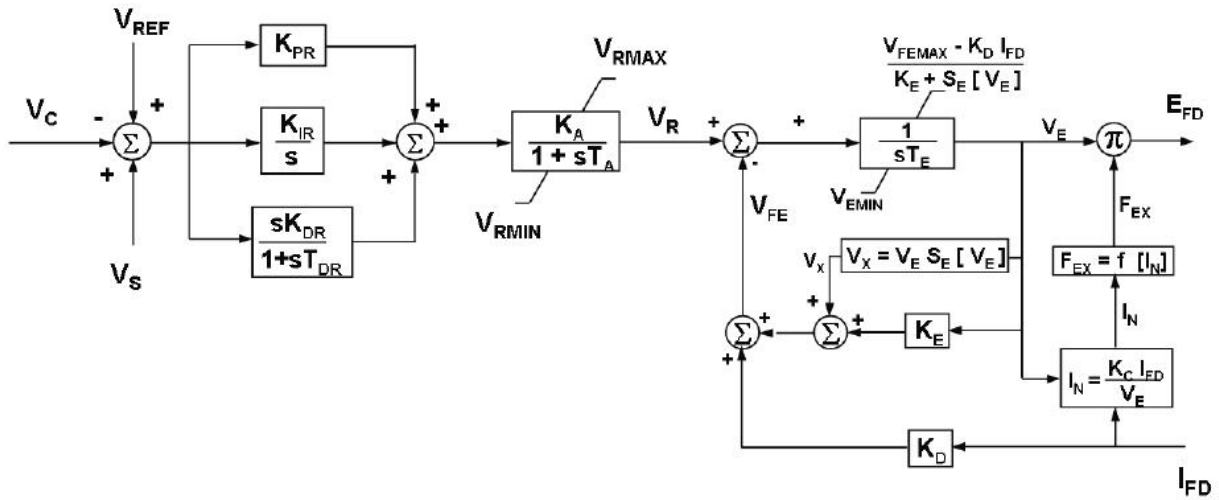


### Vedlegg C.1.2 REGULATORVERDIER

RP Amplification K	#RP	<input type="text" value="0.06"/>	
RT Amplification K	#RT	<input type="text" value="0.4"/>	
TR Integration time T	#TR	<input type="text" value="8."/>	s
TF Lag time constant T	#TF	<input type="text" value="0.05"/>	s
TG Lag time constant T	#TG	<input type="text" value="0.2"/>	s
VELM	#VELM	<input type="text" value="0.2"/>	
GMAX Upper limit (constant value)	#GMAX	<input type="text" value="0.99"/>	
GMIN Lower limit (constant value)	#GMIN	<input type="text" value="0.01"/>	
TW Integration time T	#TW	<input type="text" value="1.2"/>	s
AT Amplification K	#AT	<input type="text" value="1."/>	
DT Amplification K	#DT	<input type="text" value="0.3"/>	
QNL	#QNL	<input type="text" value="0.05"/>	

## Vedlegg C.2 AC8B

### Vedlegg C.2.1 BLOKKSJEMA

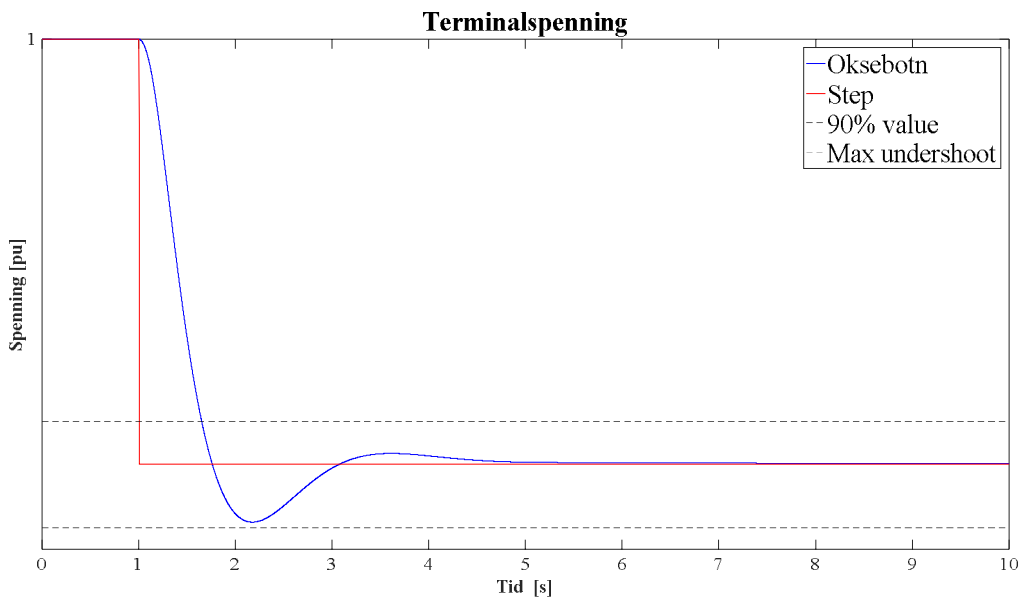
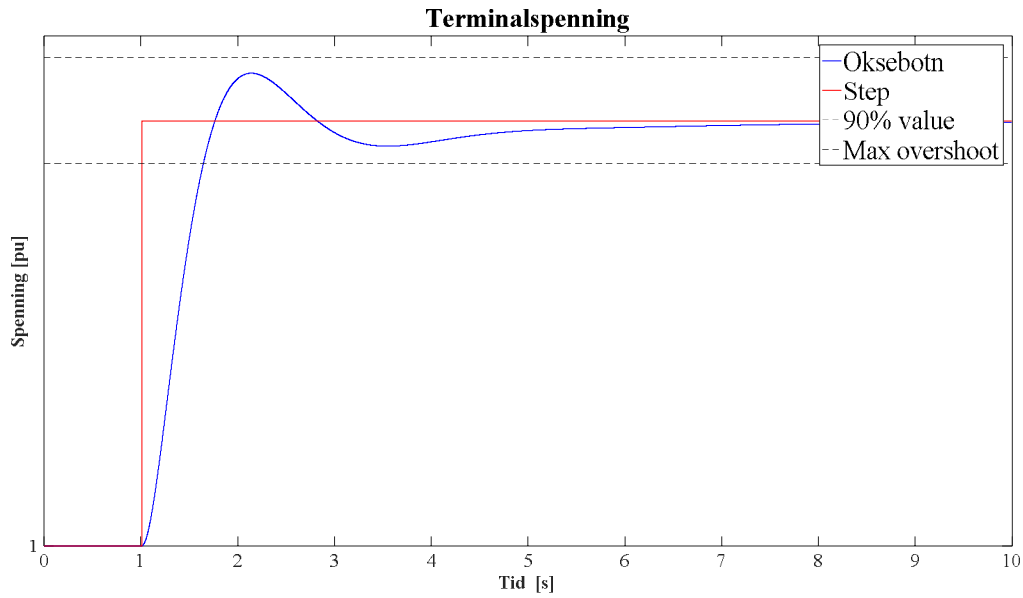


### Vedlegg C.2.2 STANDARDVERDIER

$K_{PR} = 80$	$V_{RMAX} = 35$	$SE_{(E1)} = 0.3$
$K_{IR} = 5$	$V_{RMIN} = 0$	$E_1 = 6.5$
$K_{DR} = 10$	$K_E = 1.0$	$SE_{(E2)} = 3.0$
$T_{DR} = 0.1$	$T_E = 1.2$	$E_2 = 9.0$
$V_{FEmax} = 6.0$	$K_C = 0.55$	$K_D = 1.1$

Vedlegg C.2.3 TUNING AV OKSEBOTN

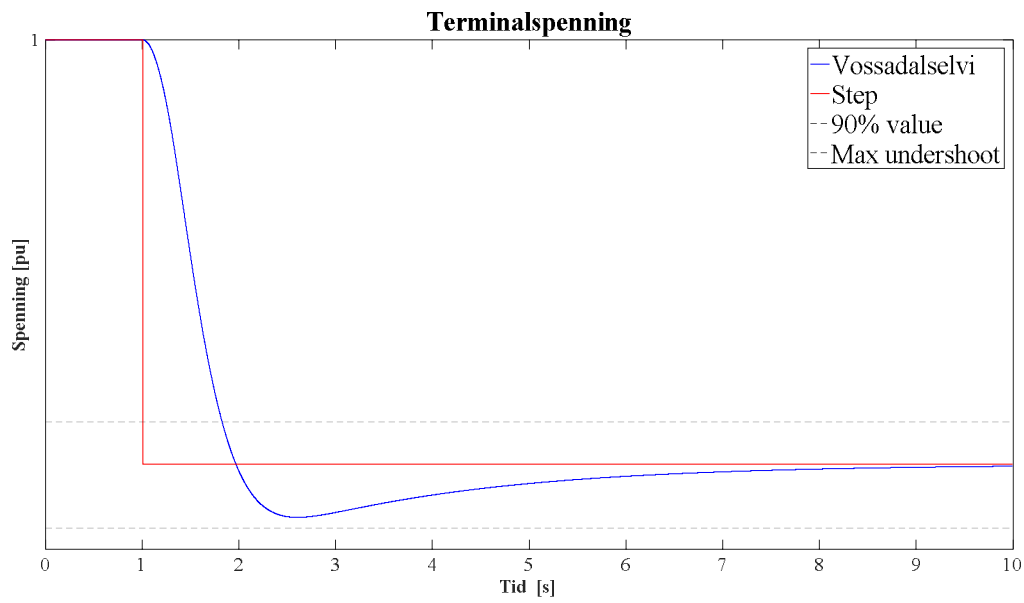
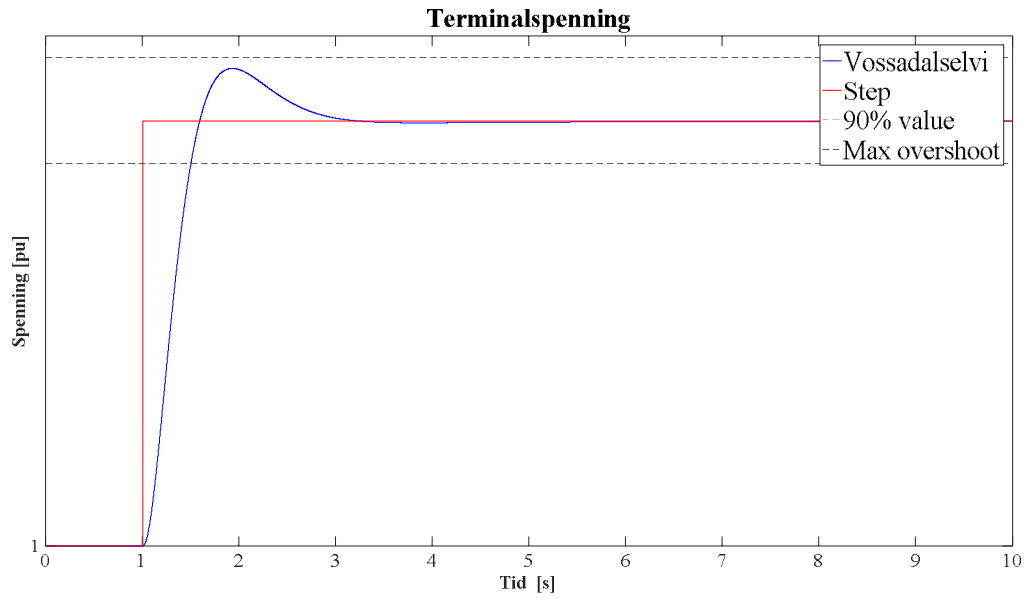
$K_{PR}$  20  
 $K_{IR}$  12  
 $K_{DR}$  9



Vedlegg

Vedlegg C.2.4 TUNING AV VOSSADALSELVI

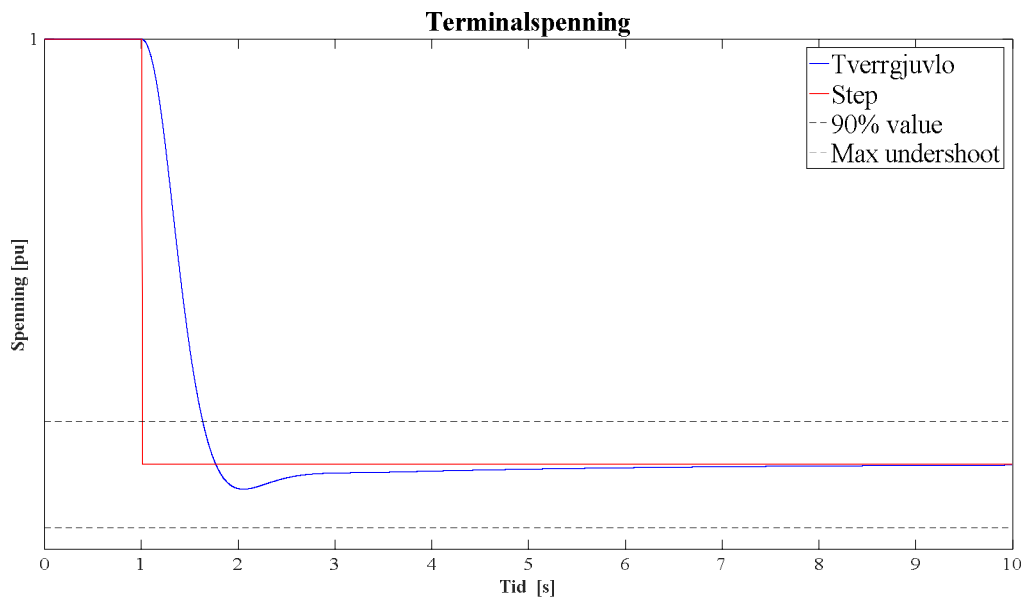
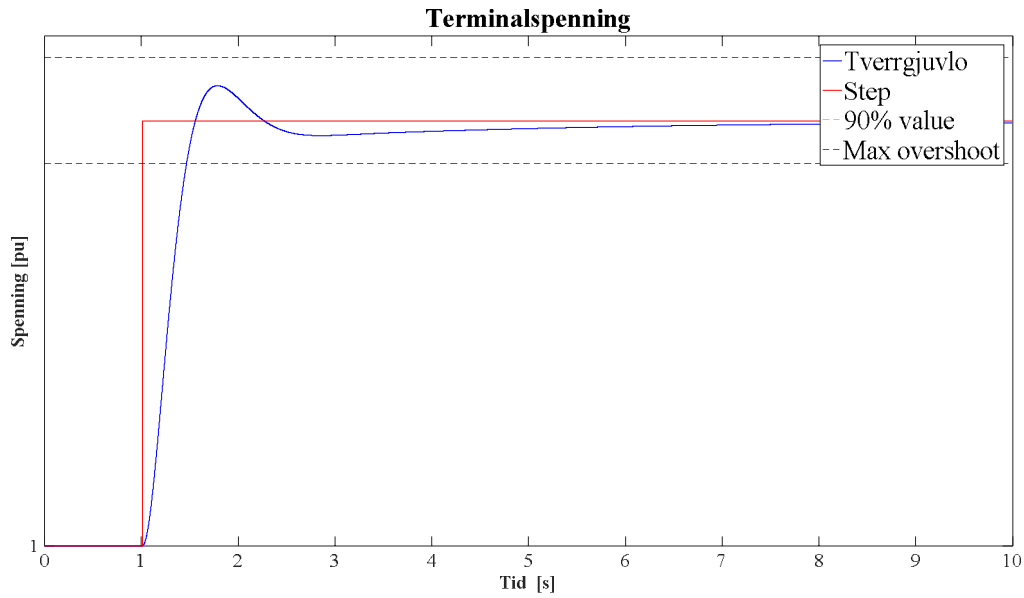
$K_{PR}$  26  
 $K_{IR}$  10  
 $K_{DR}$  10



Vedlegg

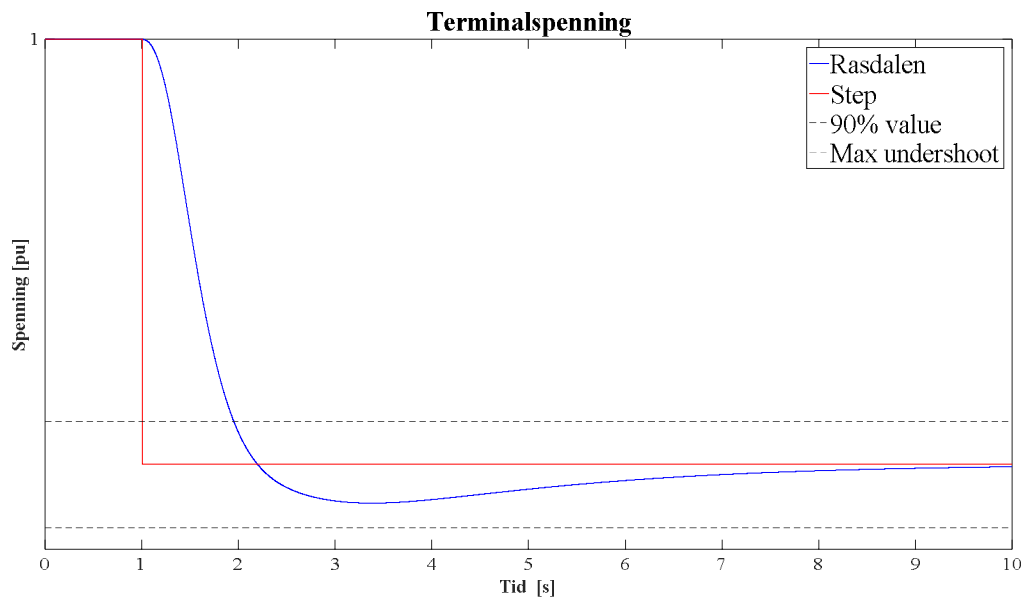
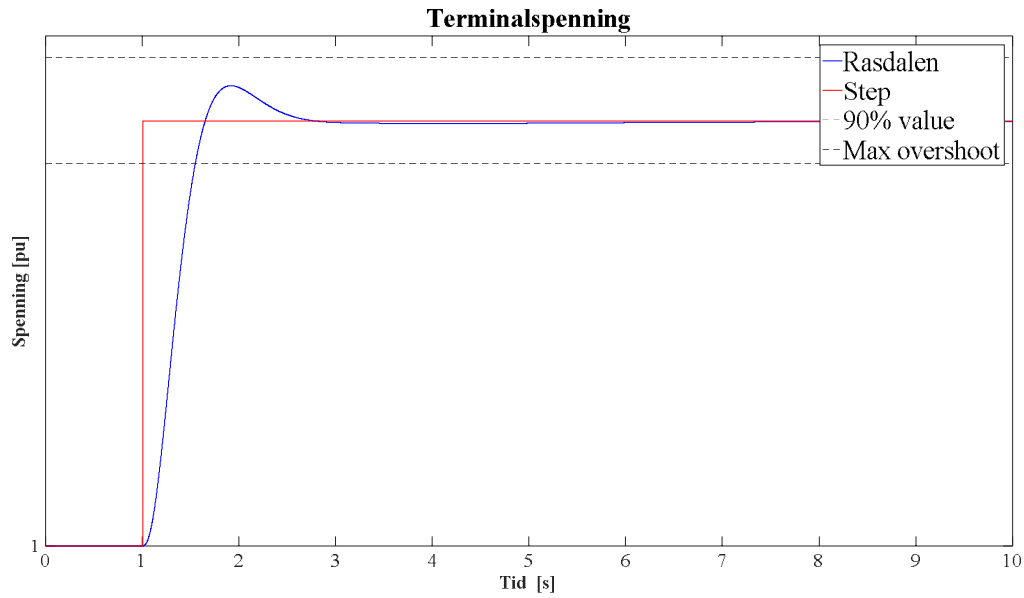
Vedlegg C.2.5 TUNING AV TVERRGJUVLO

$K_{PR}$  20  
 $K_{IR}$  6  
 $K_{DR}$  6



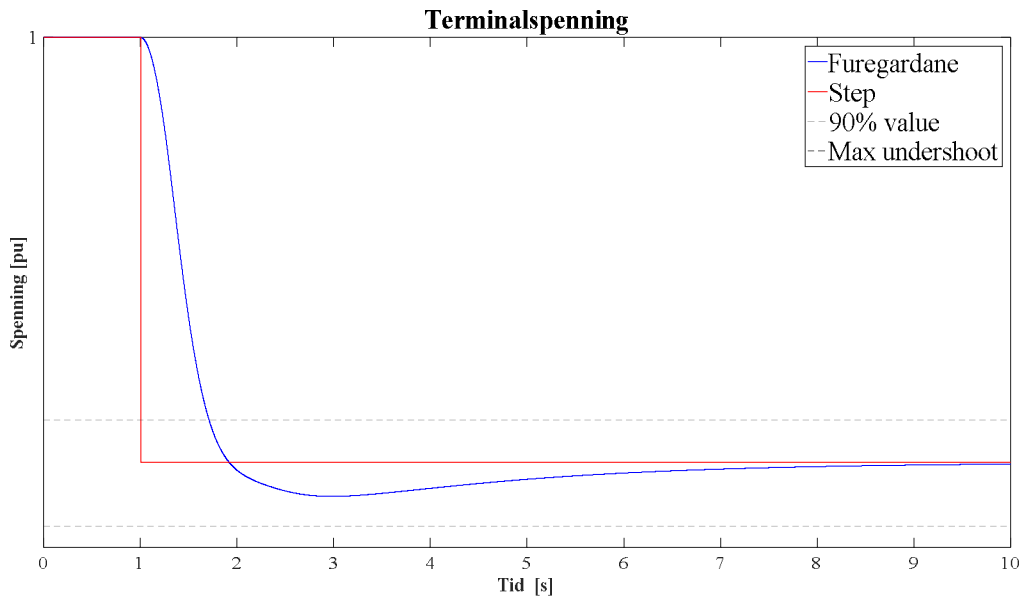
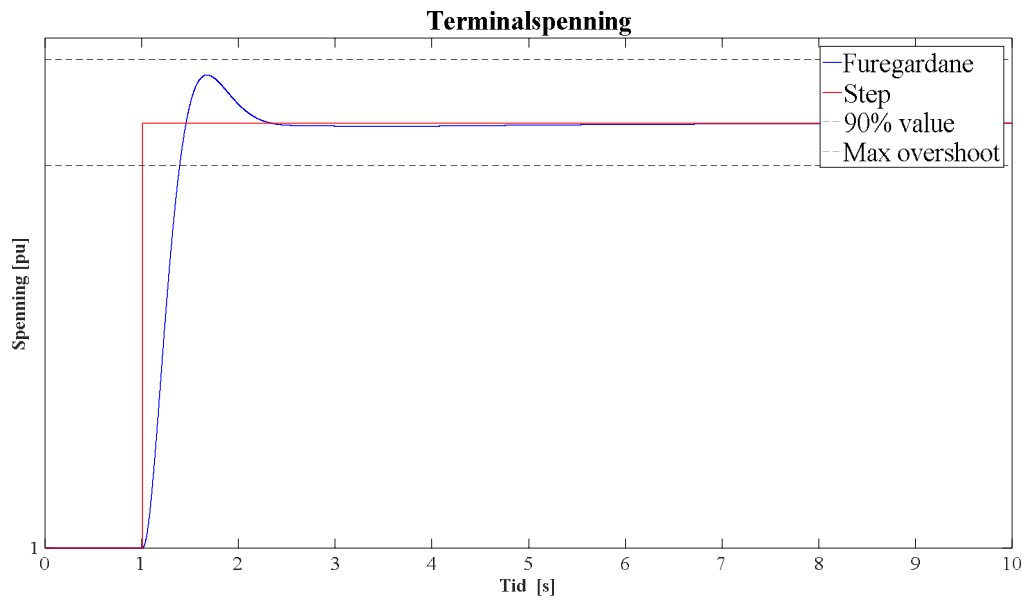
Vedlegg C.2.6 TUNING AV RASDALEN

$K_{PR}$  20  
 $K_{IR}$  7  
 $K_{DR}$  10



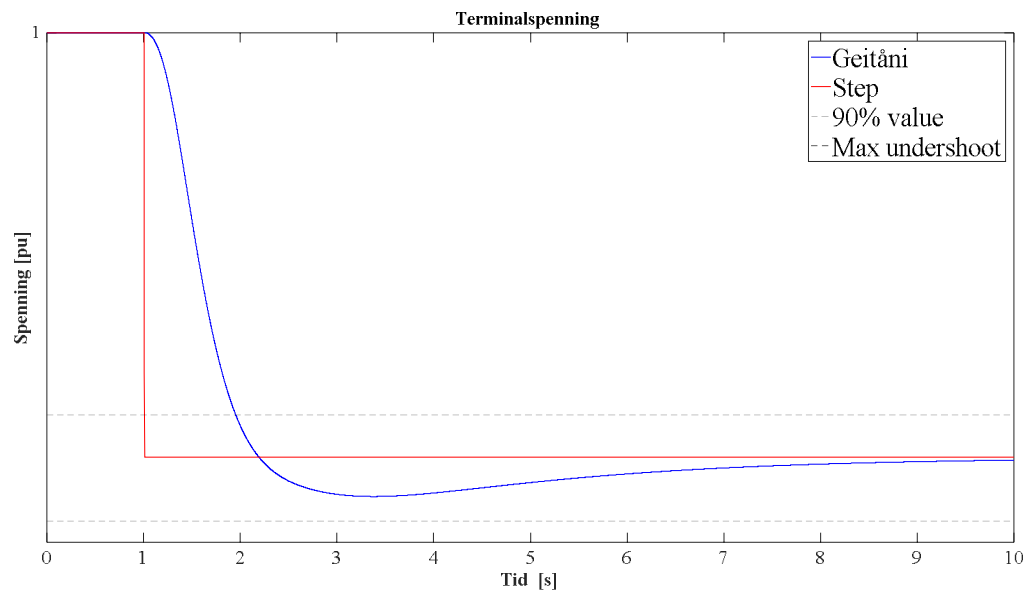
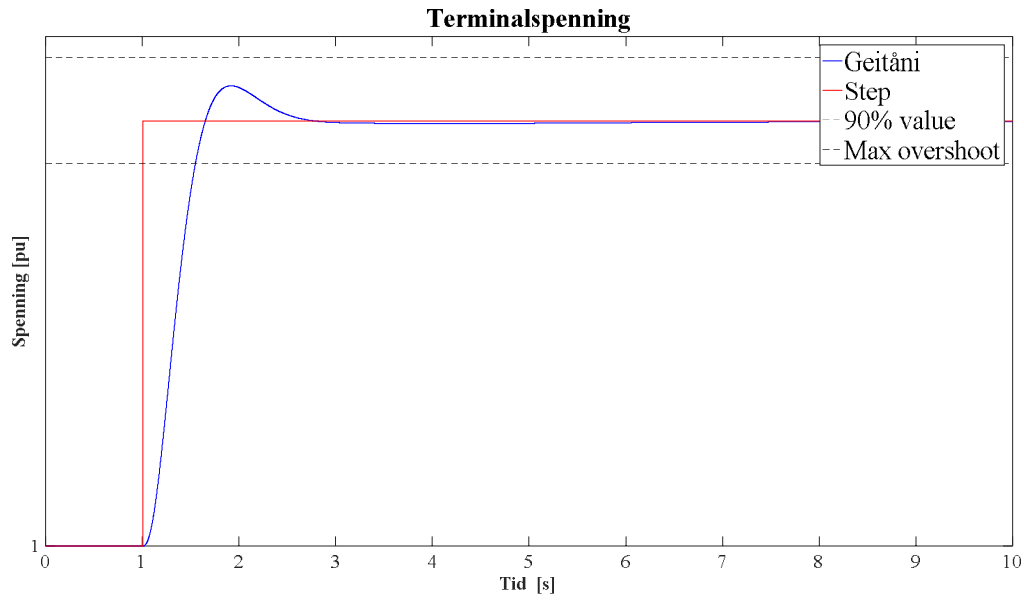
Vedlegg C.2.7 TUNING AV FUREGARDANE

$K_{PR}$  26  
 $K_{IR}$  10  
 $K_{DR}$  10



Vedlegg C.2.8 TUNING AV GEITÅNI

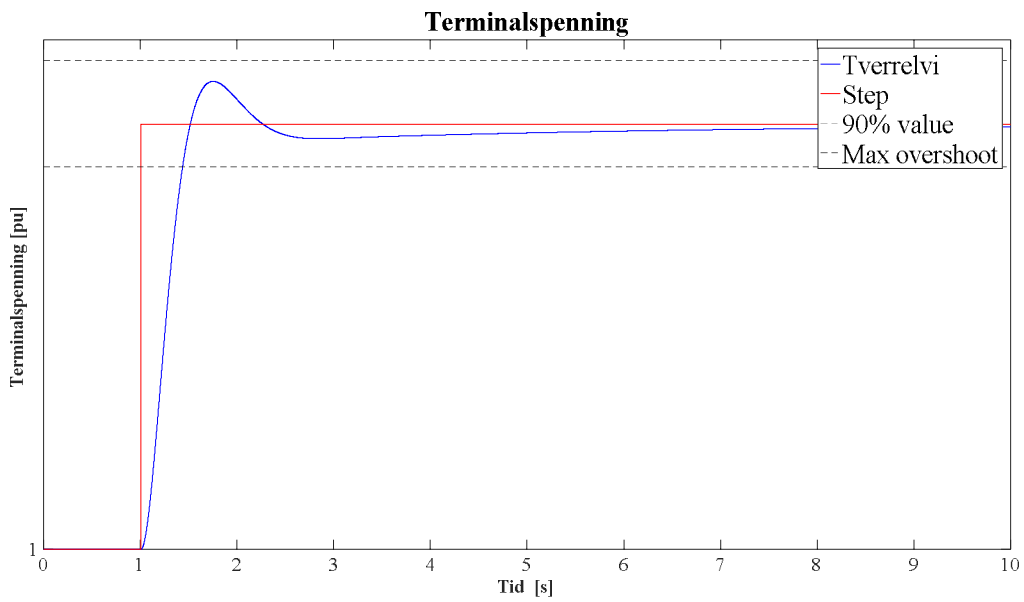
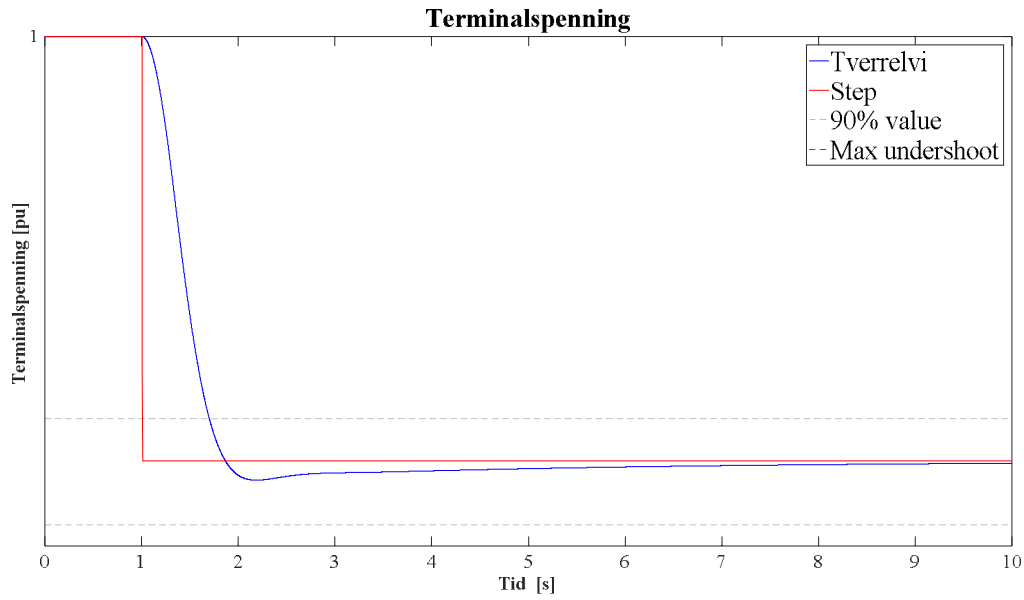
$K_{PR}$  10  
 $K_{IR}$  20  
 $K_{DR}$  5





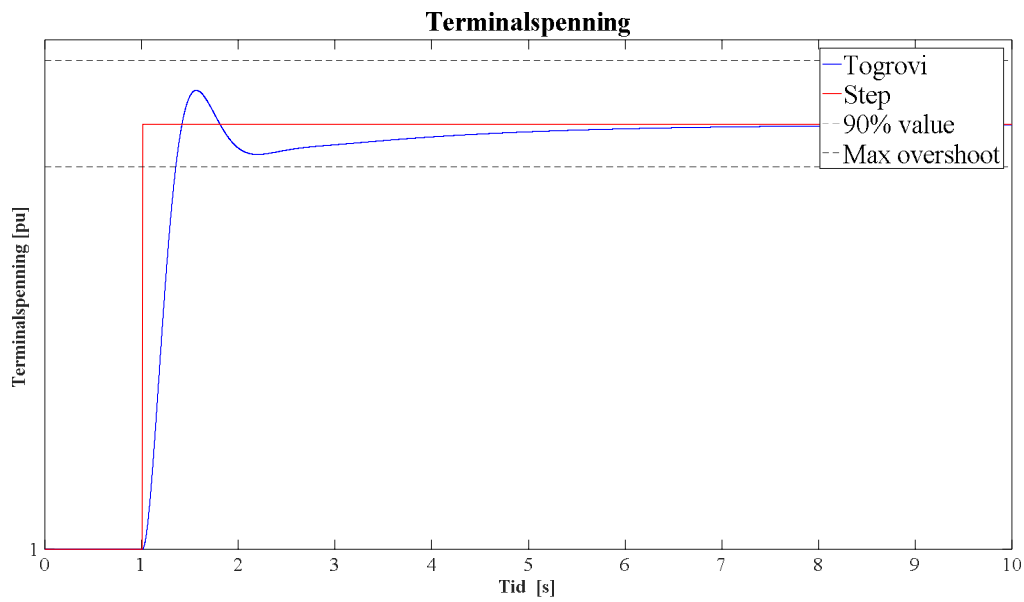
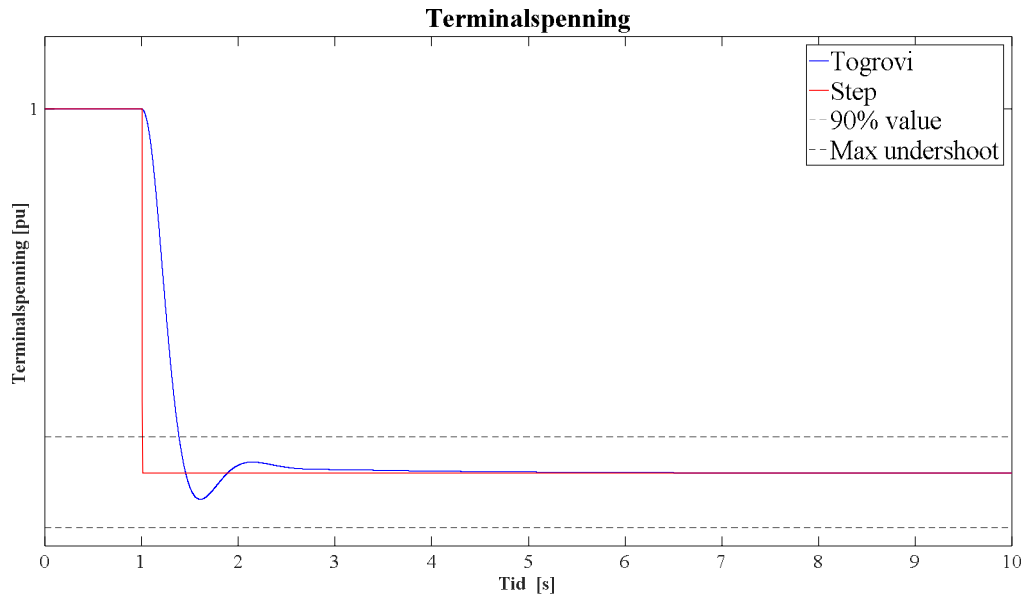
Vedlegg C.2.9 TUNING AV TVERRELVI

$K_{PR}$  25  
 $K_{IR}$  6  
 $K_{DR}$  8



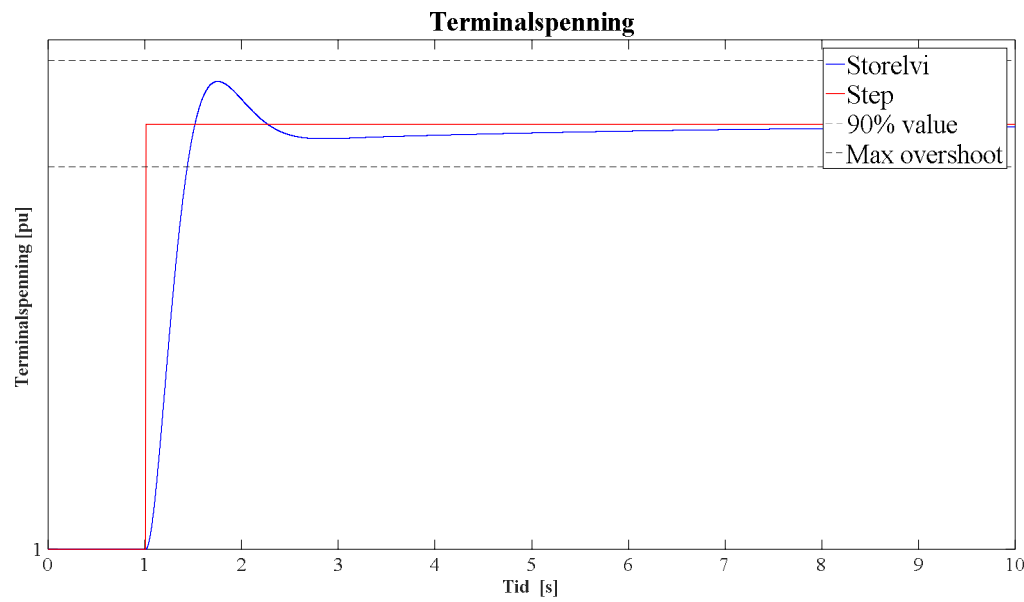
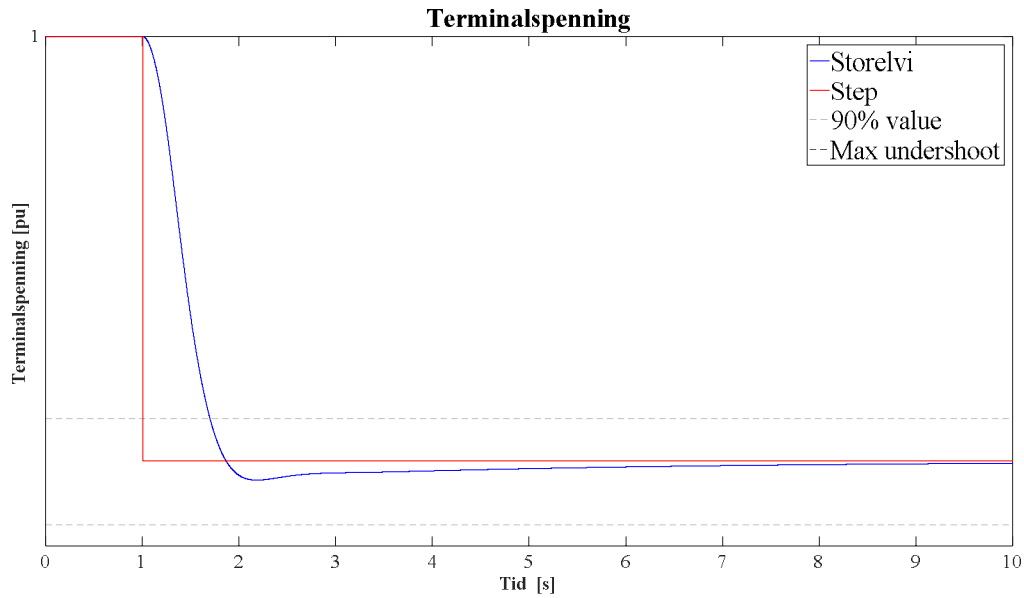
Vedlegg C.2.10 TUNING AV TOGROVI

$K_{PR}$  30  
 $K_{IR}$  12  
 $K_{DR}$  9



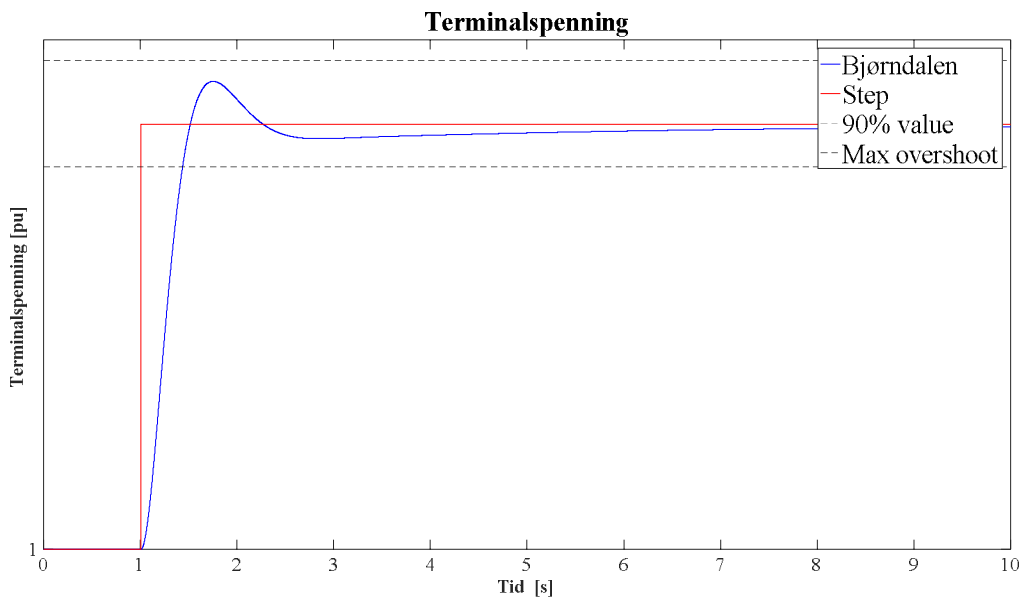
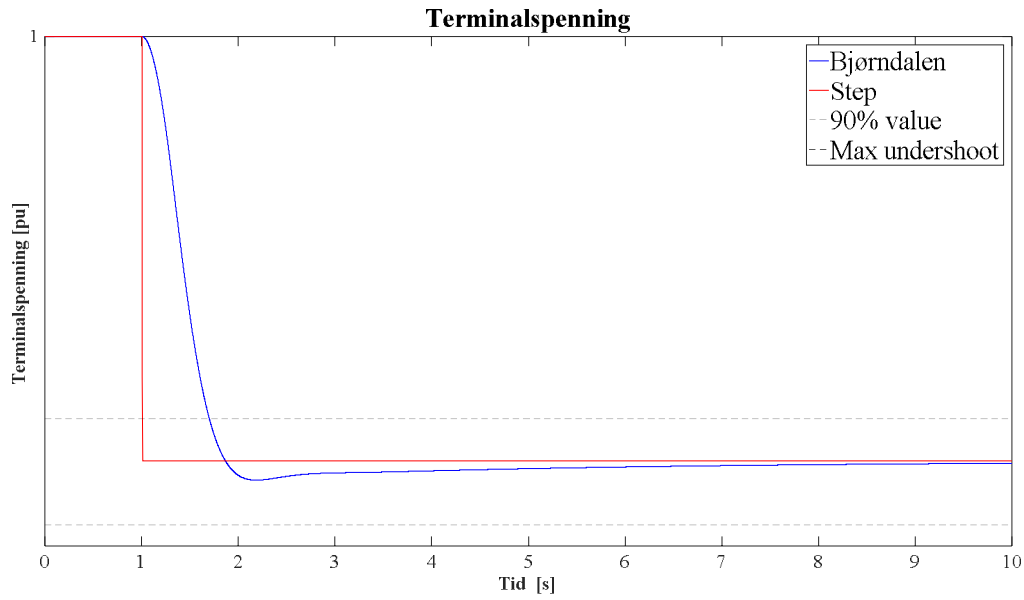
Vedlegg C.2.11 TUNING AV STORELVI

$K_{PR}$  25  
 $K_{IR}$  6  
 $K_{DR}$  8



Vedlegg C.2.12 TUNING AV BJØRNDALEN

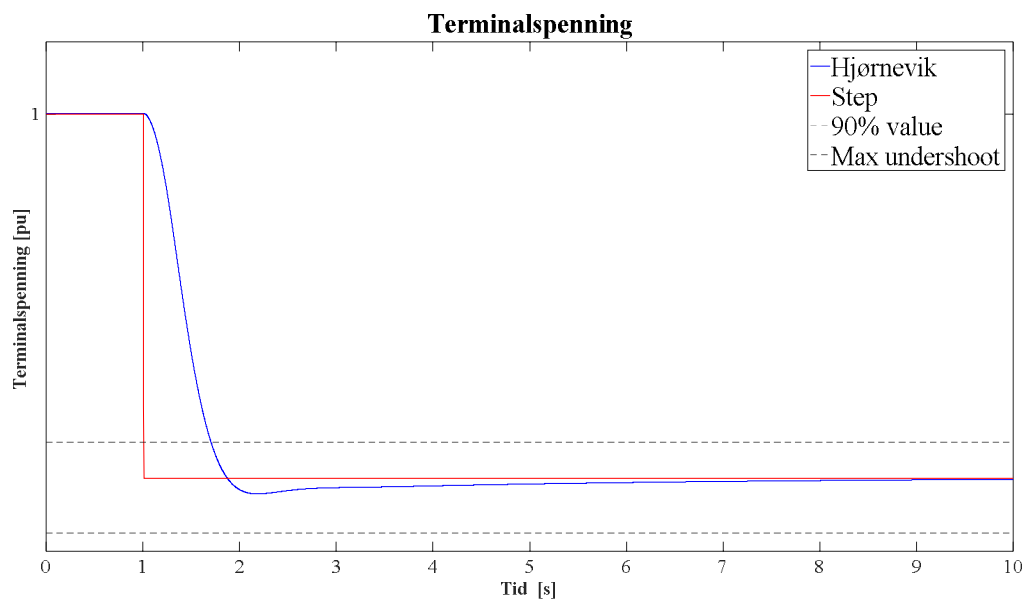
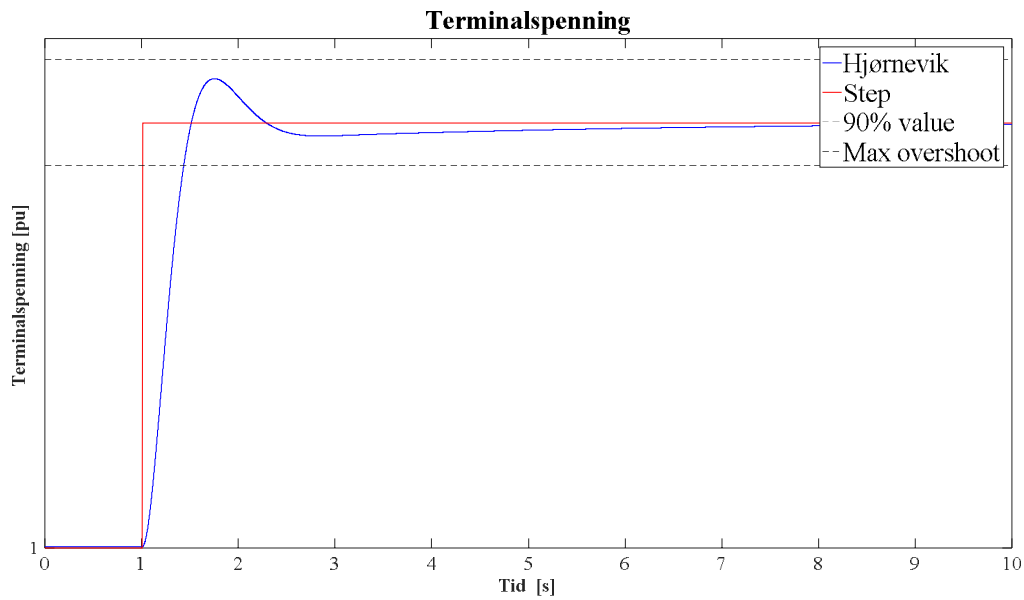
$K_{PR}$  25  
 $K_{IR}$  6  
 $K_{DR}$  8



# Vedlegg

## Vedlegg C.2.13 TUNING AV HJØRNEVIK

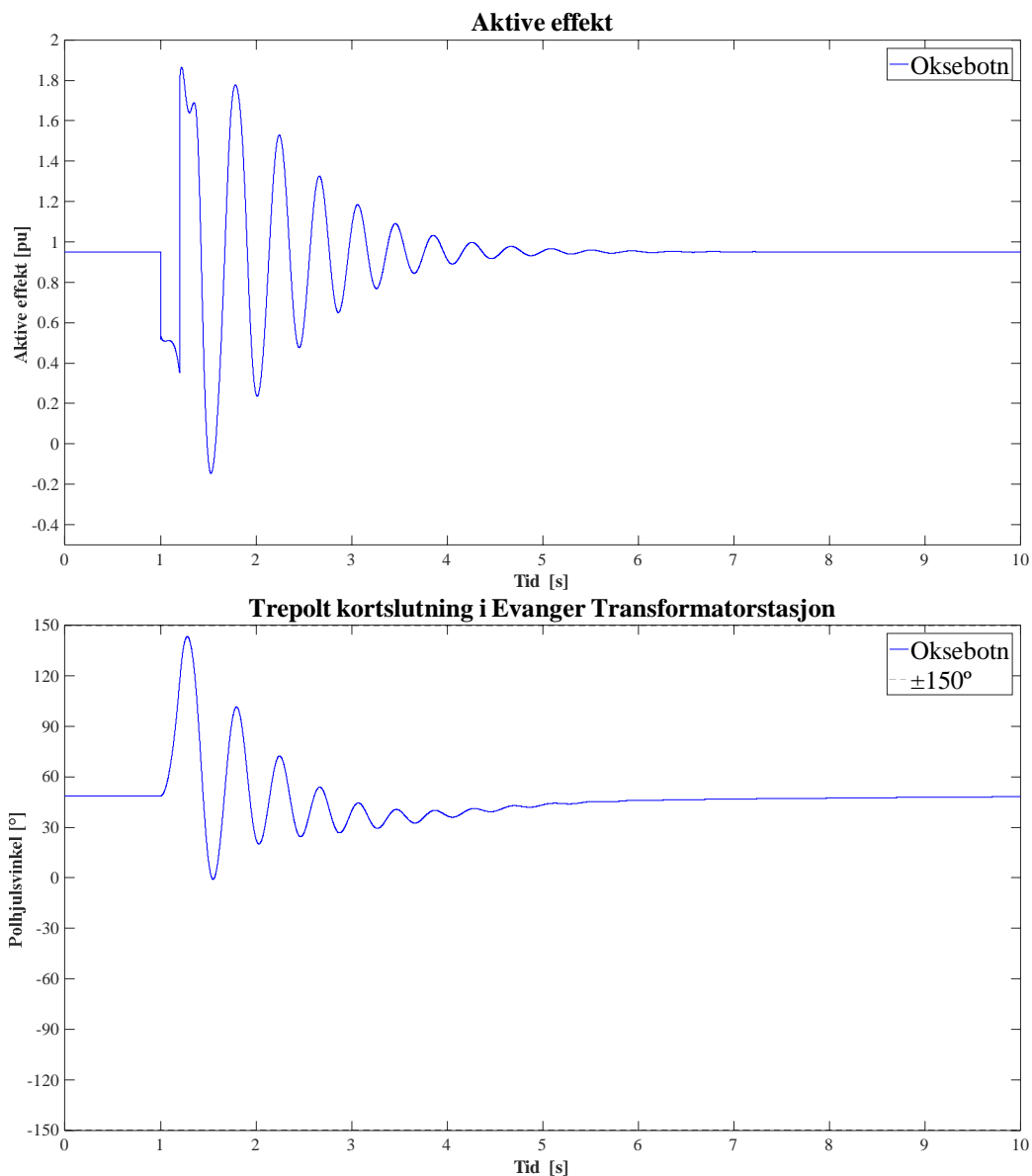
$K_{PR}$  25  
 $K_{IR}$  6  
 $K_{DR}$  8



# Vedlegg D RESULTATER FRA STUDIER I EKSISTERENDE NETT

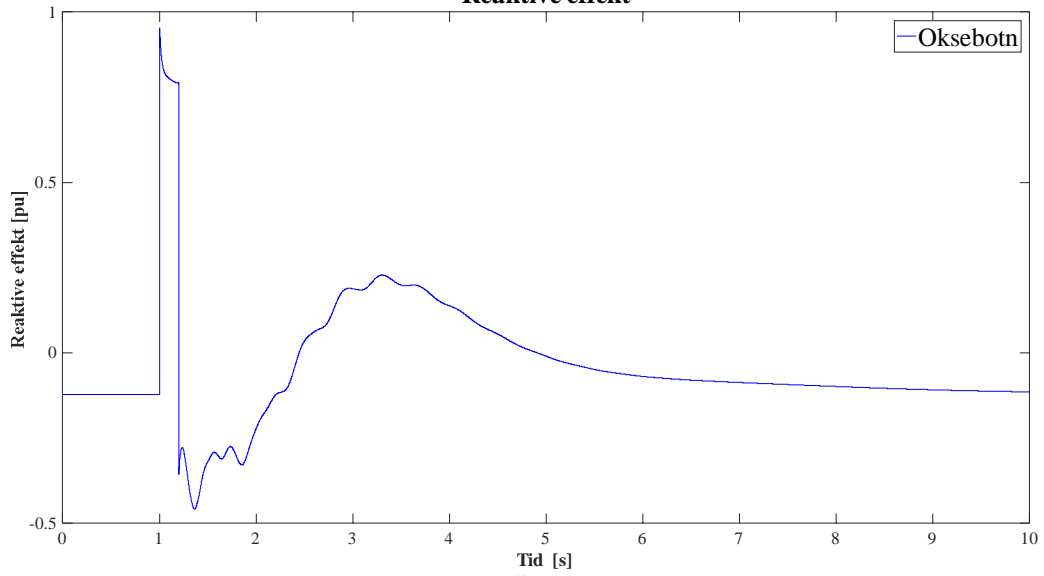
## Vedlegg D.1 RESULTATER FRA DEN TRANSIENTE ANALYSEN

### Vedlegg D.1.1 OKSEBOTN KRAFTSTASJON

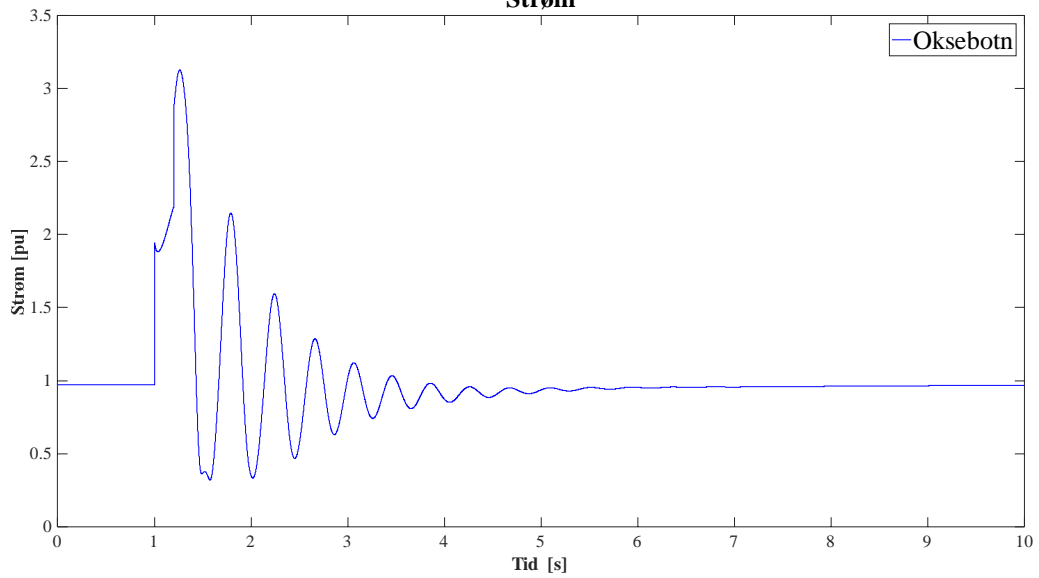


# Vedlegg

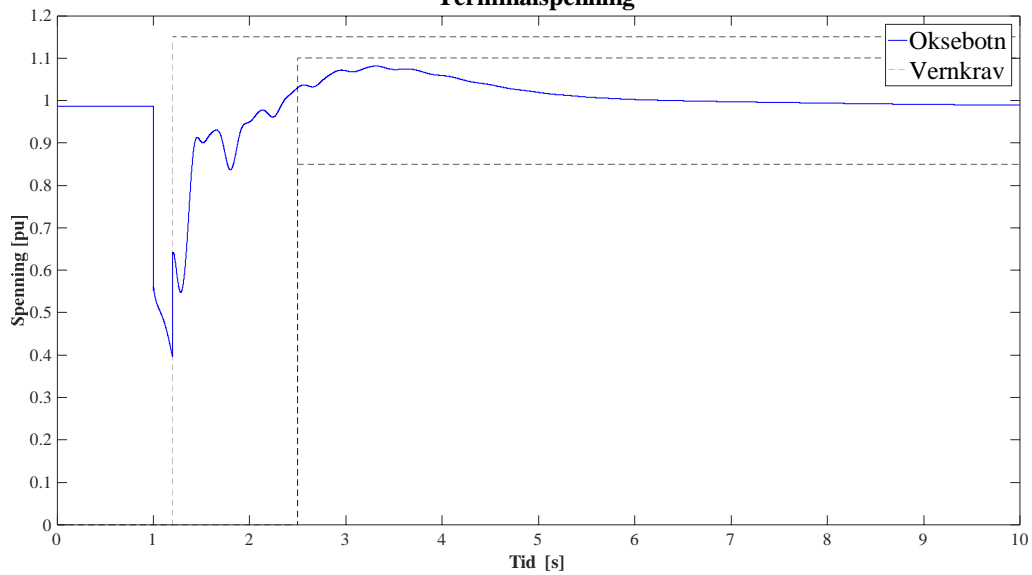
## Reaktive effekt



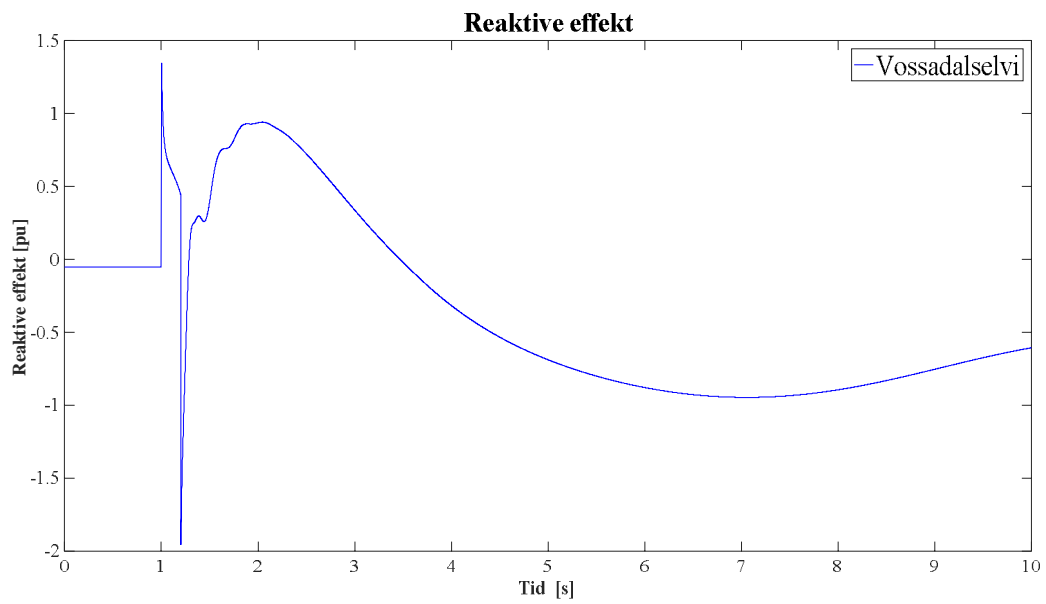
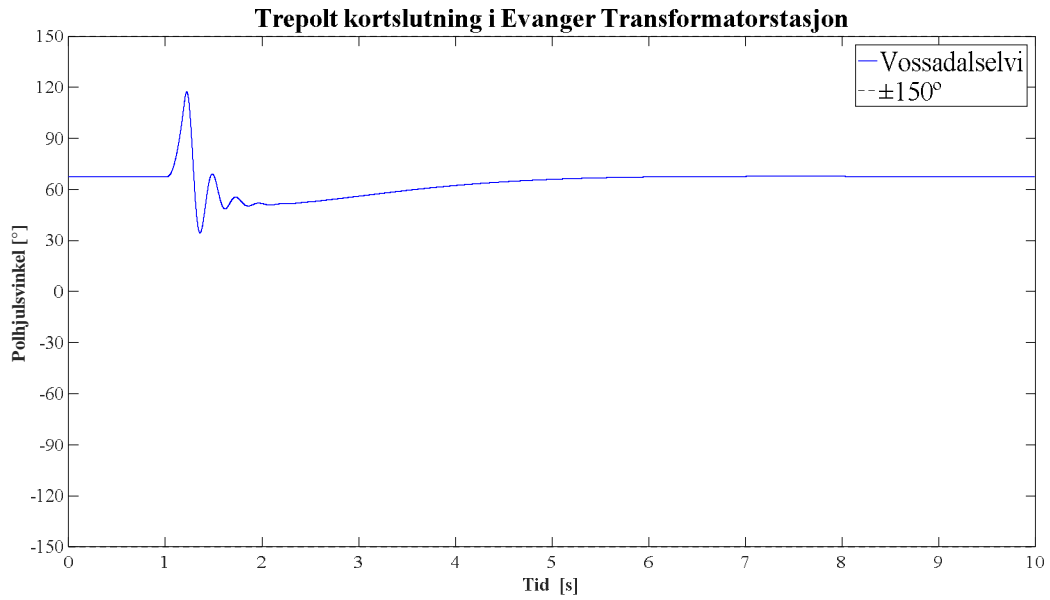
## Strøm



## Terminalspenning



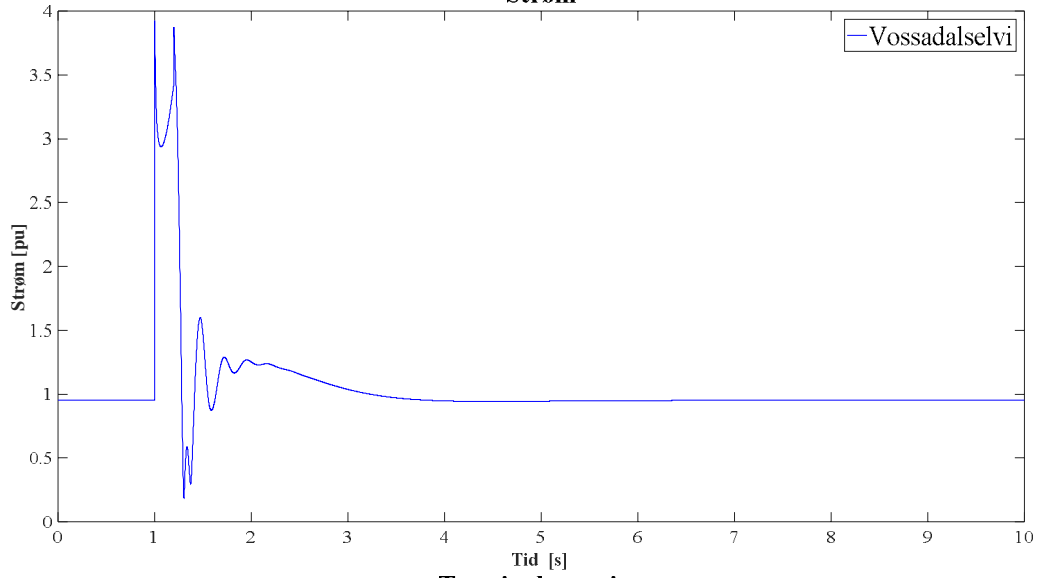
Vedlegg D.1.2 VOSSADALSELVI KRAFTSTASJON



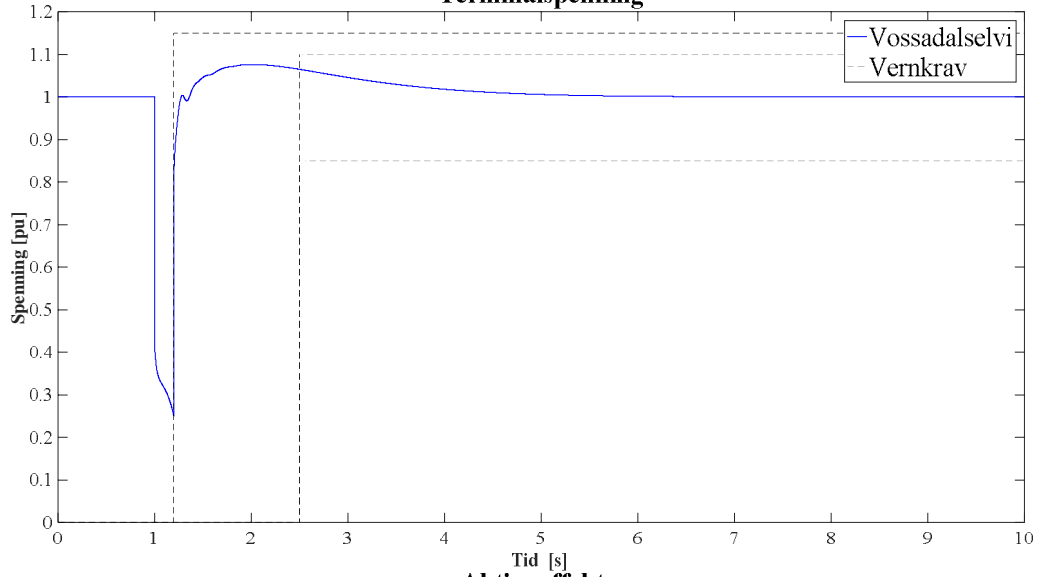


# Vedlegg

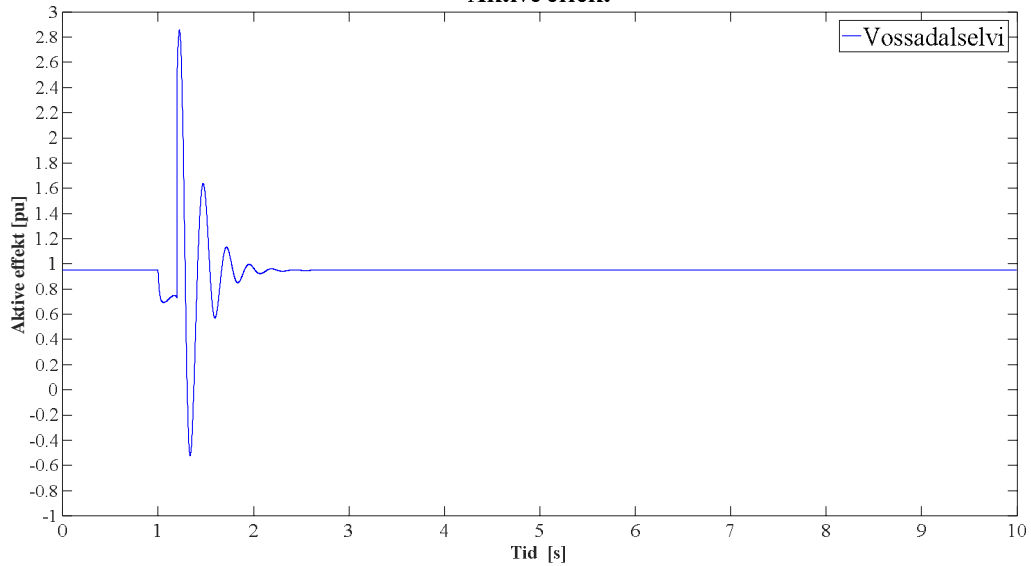
## Strøm



## Terminalspenning

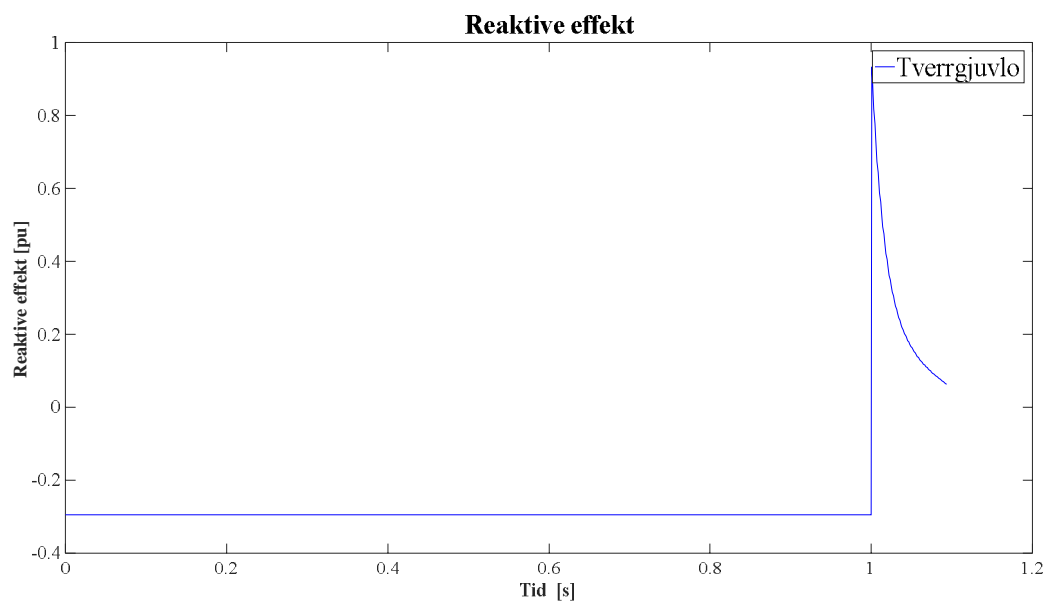
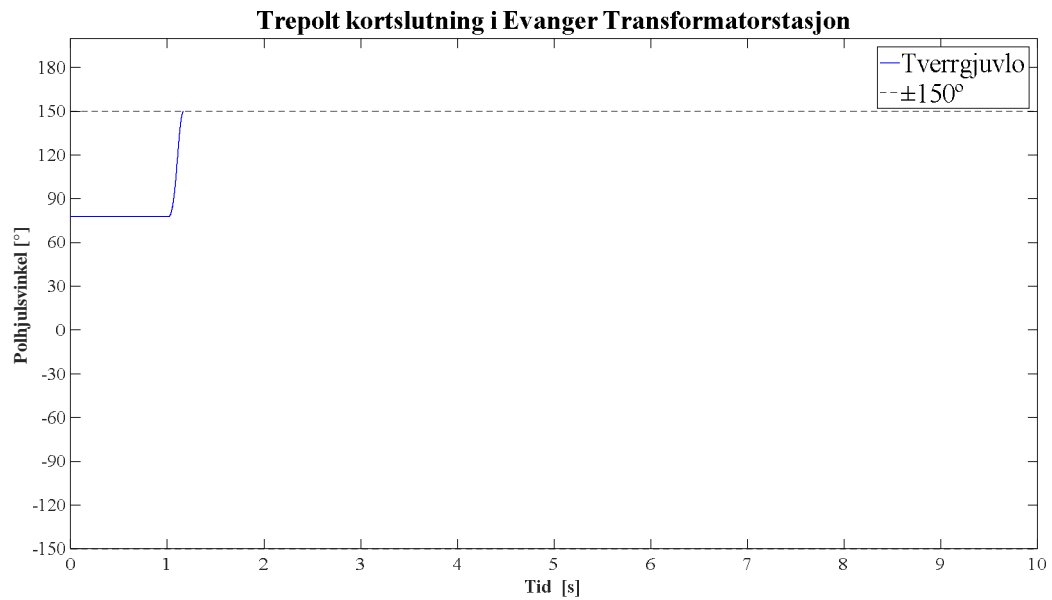


## Aktive effekt



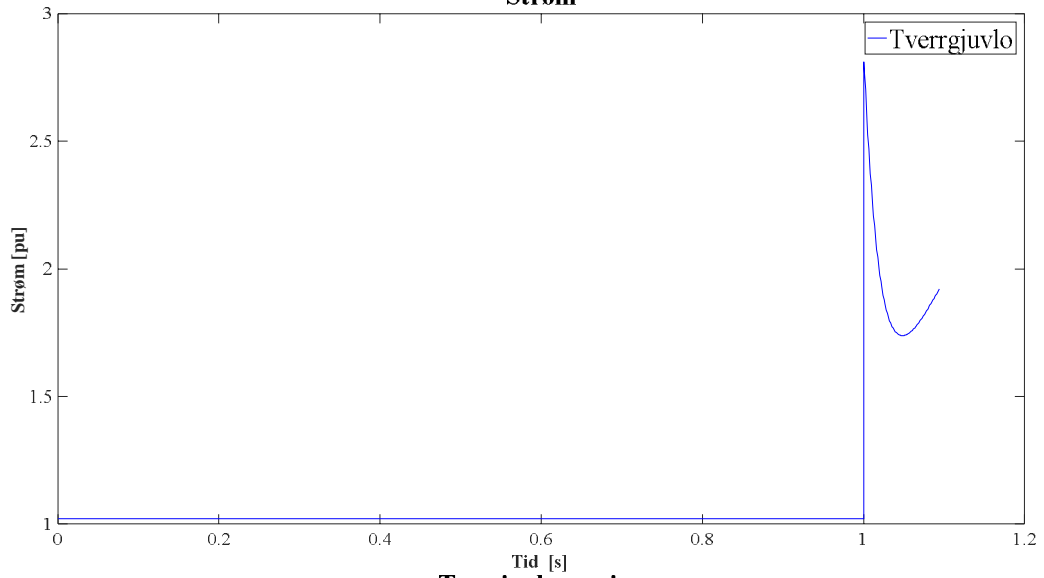
## Vedlegg

### Vedlegg D.1.3 TVERRGJUVLO KRAFTSTASJON

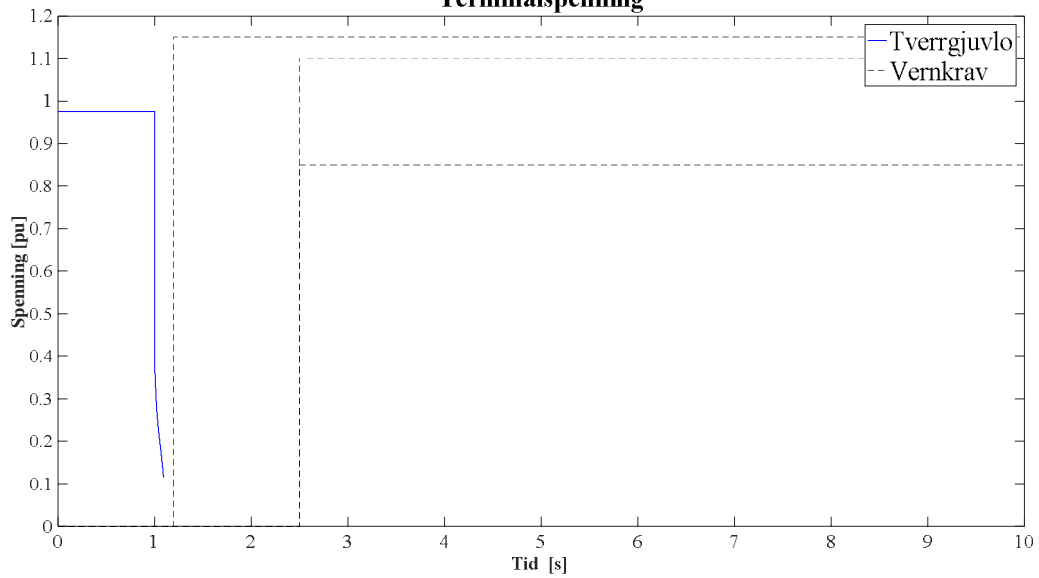


# Vedlegg

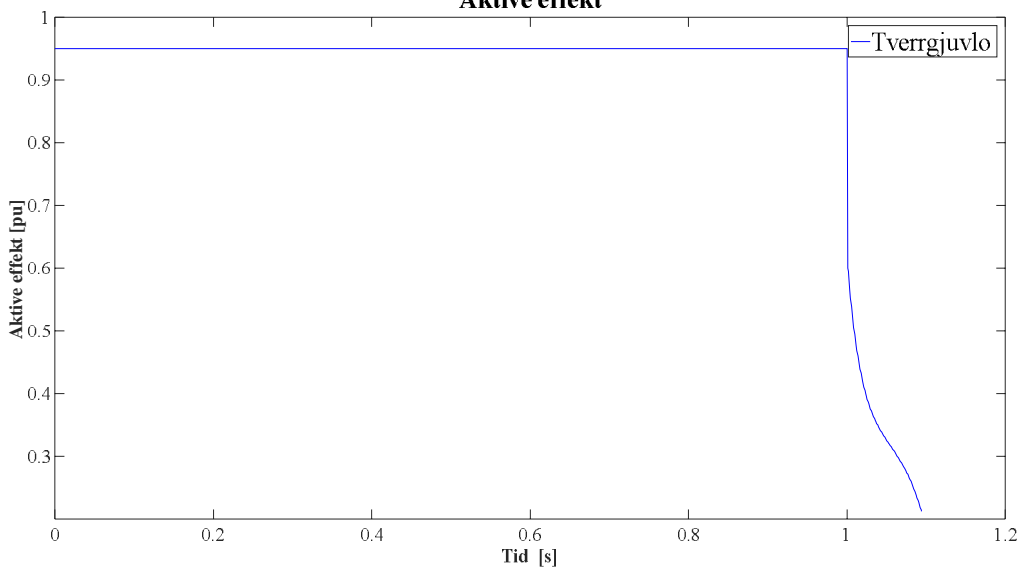
## Strøm



## Terminalspenning

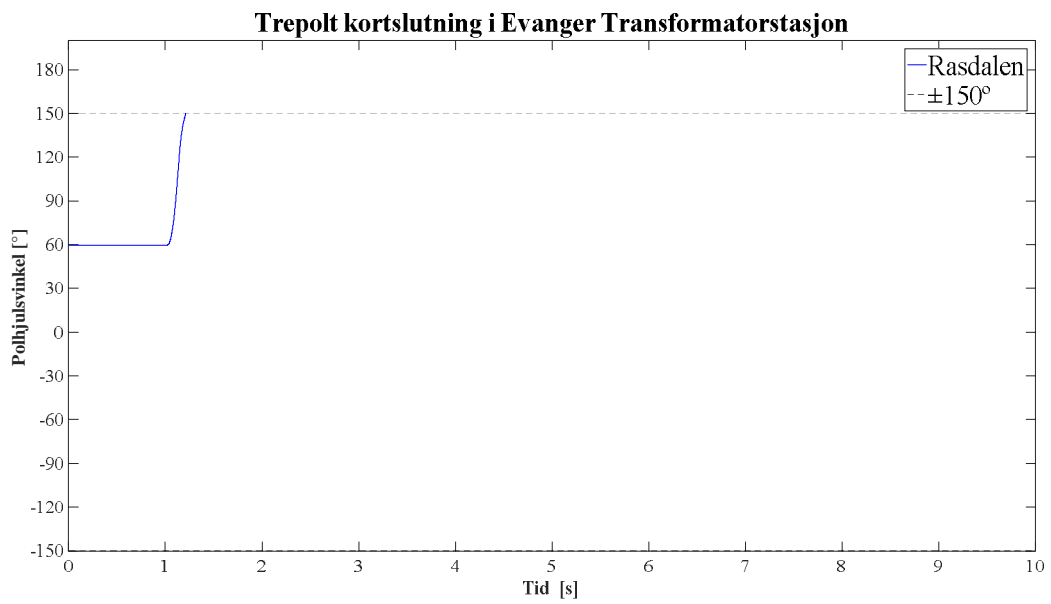
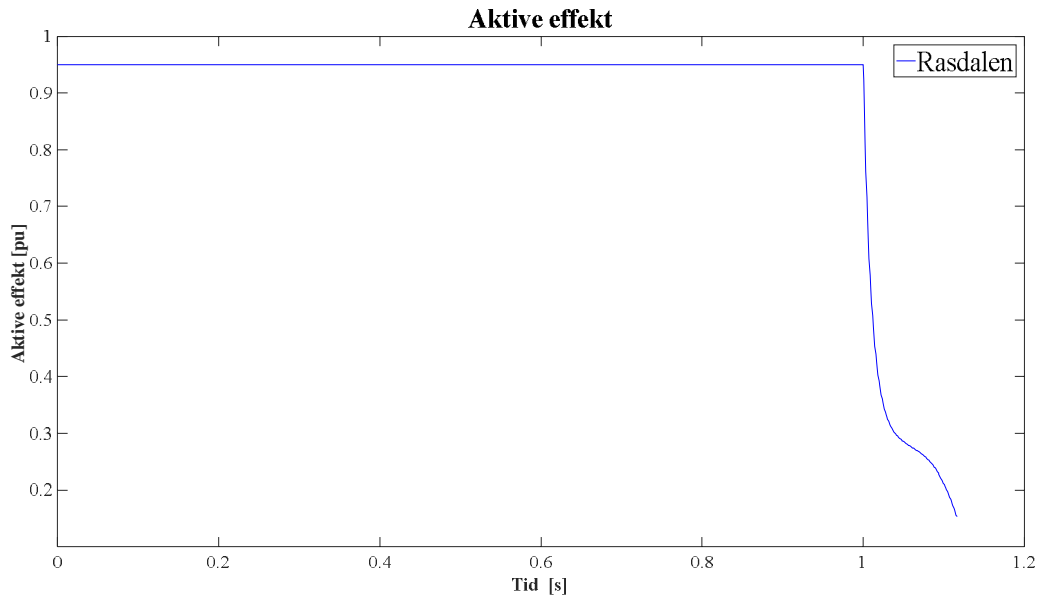


## Aktive effekt



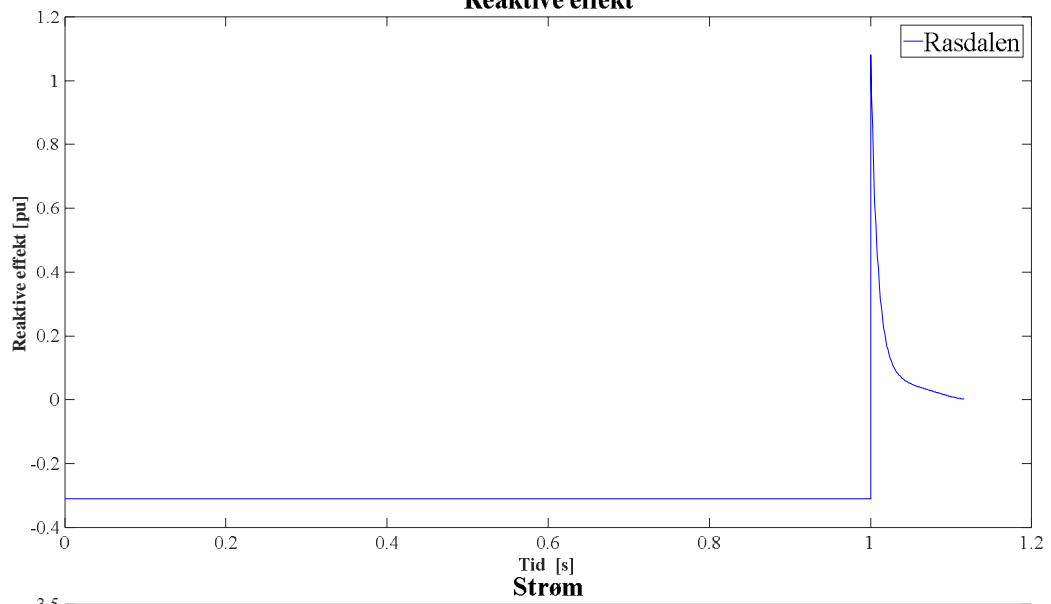
# Vedlegg

## Vedlegg D.1.4 RASDALEN KRAFTSTASJON

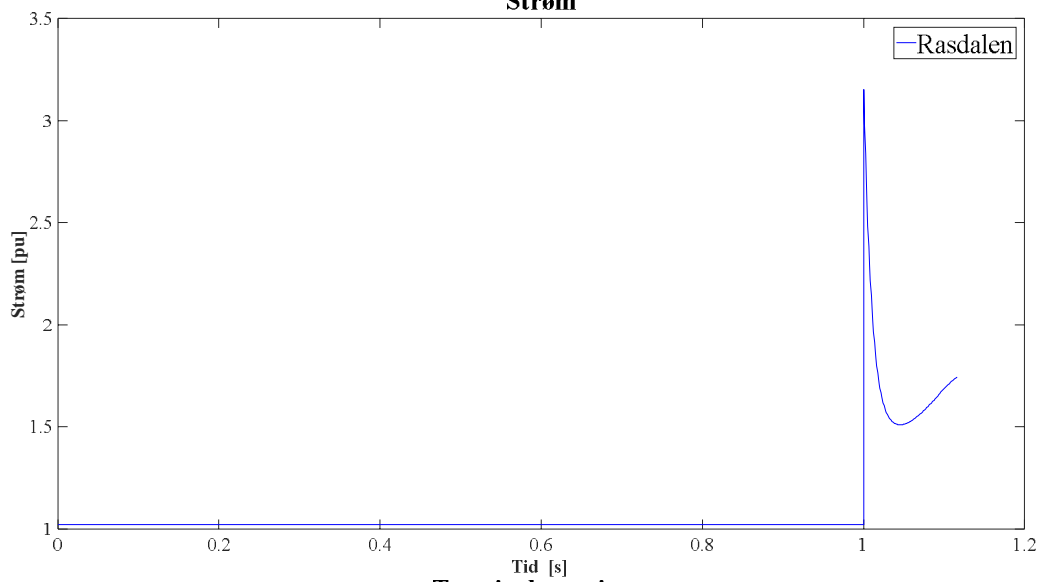


# Vedlegg

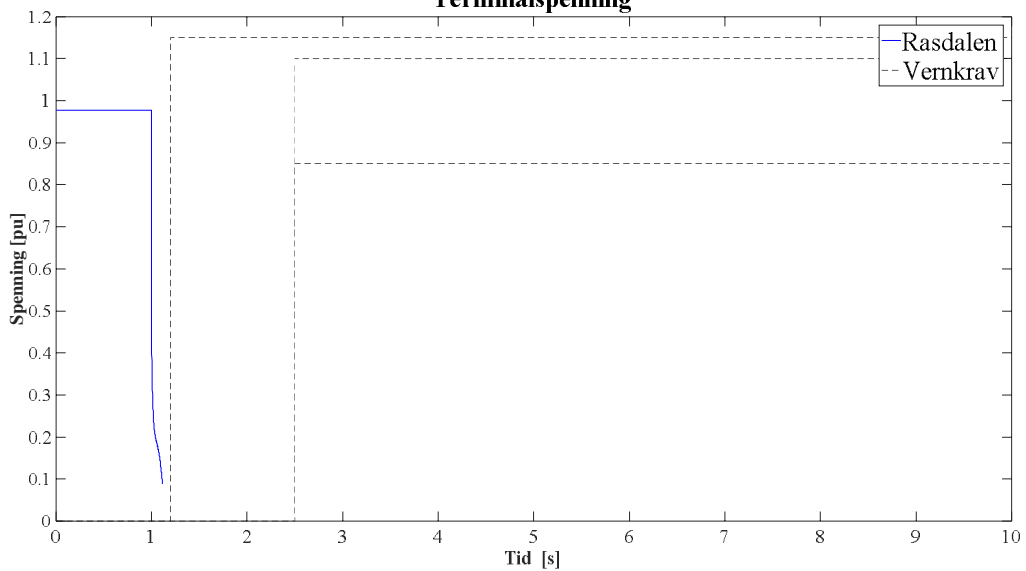
## Reaktive effekt



## Strøm

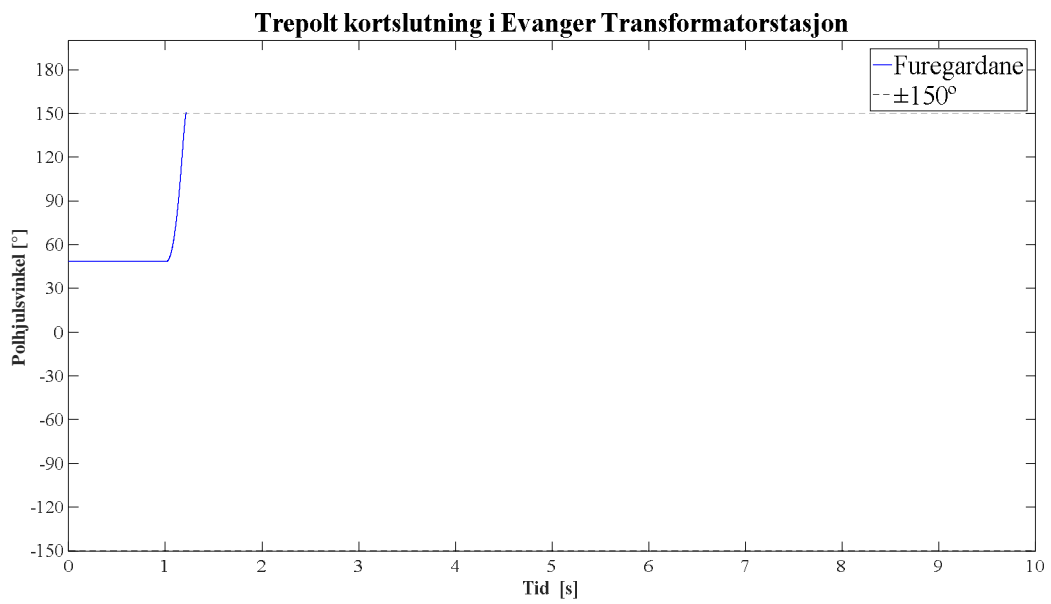
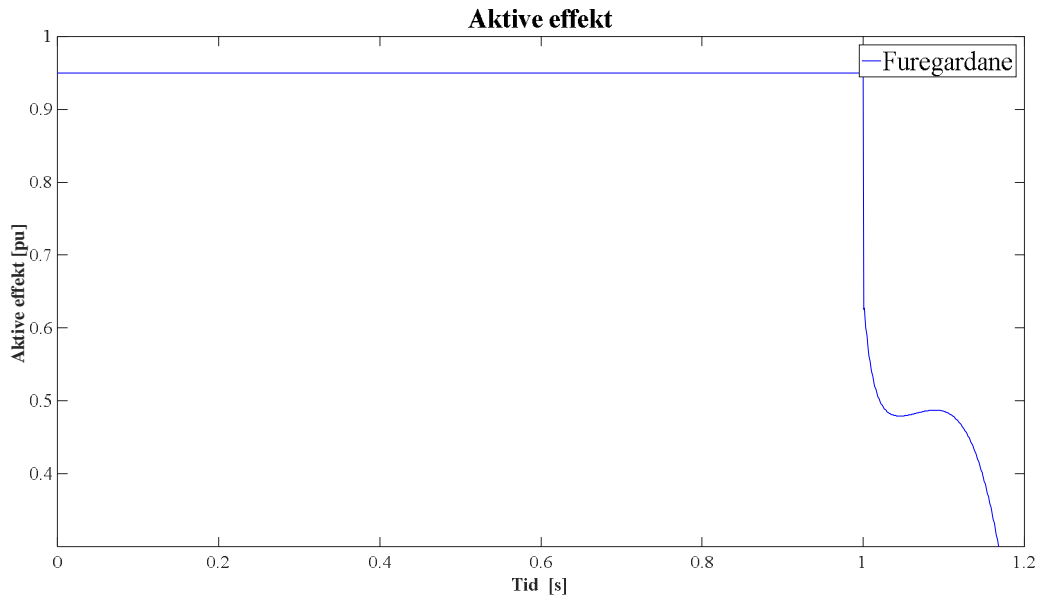


## Terminalspenning



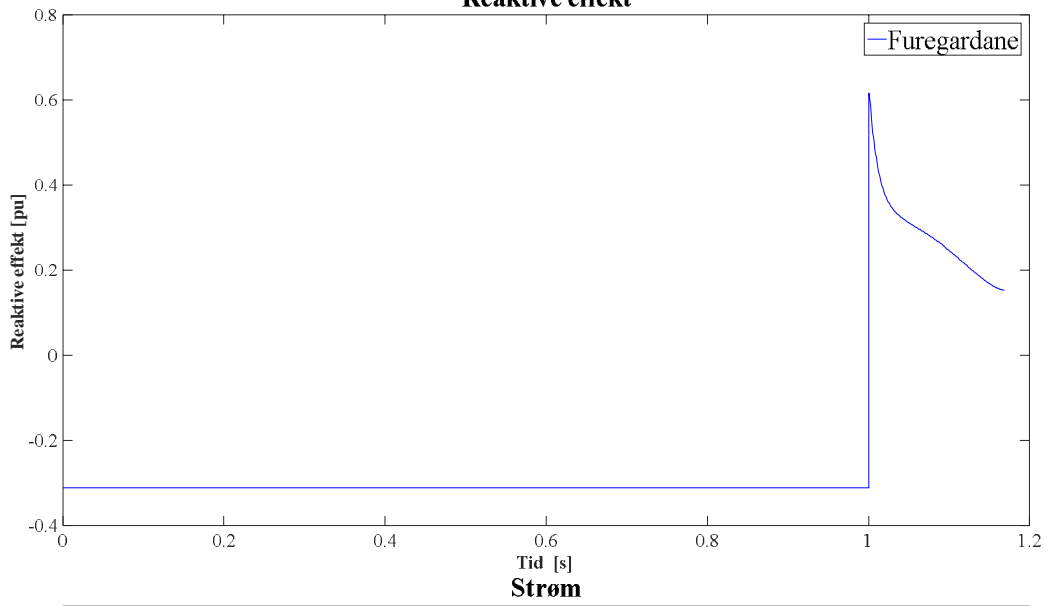
# Vedlegg

## Vedlegg D.1.5 FUREGARDANE KRAFTSTASJON

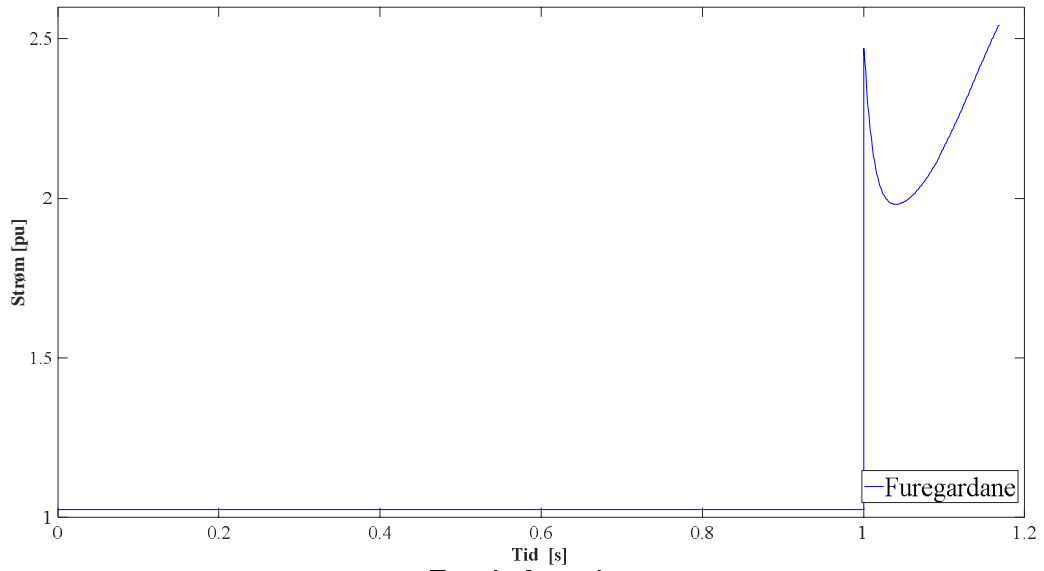


# Vedlegg

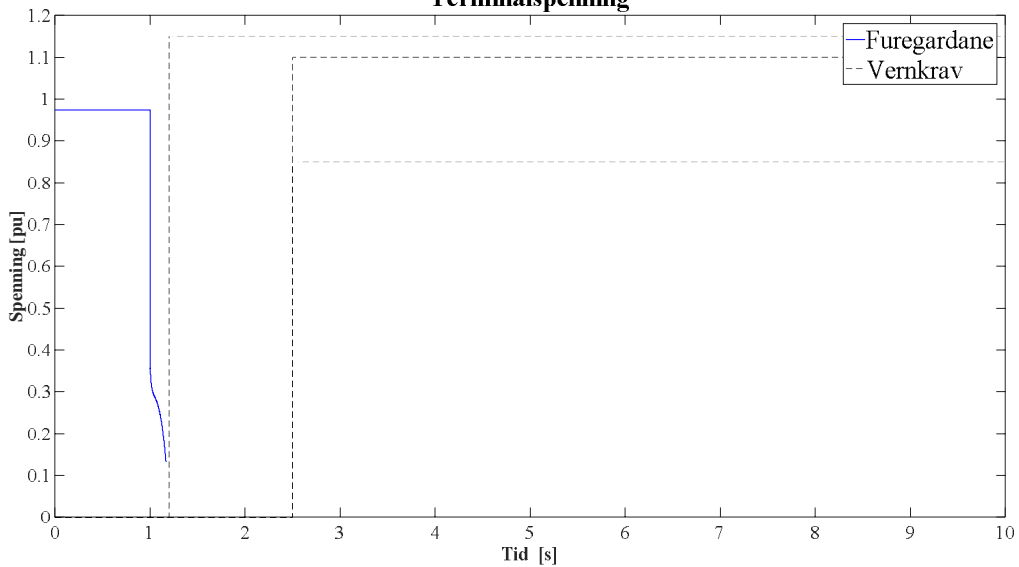
## Reaktive effekt



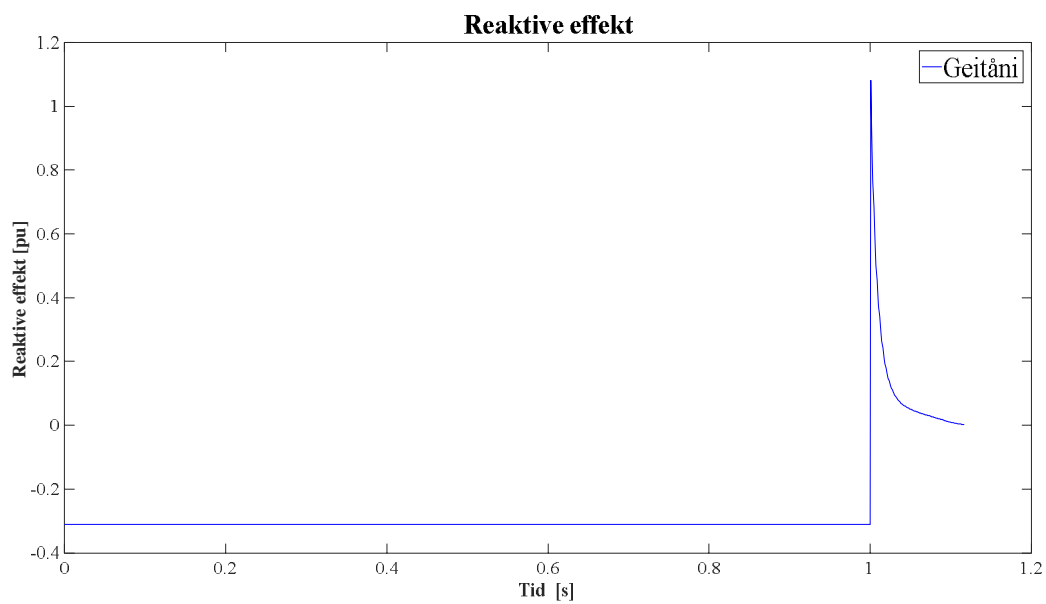
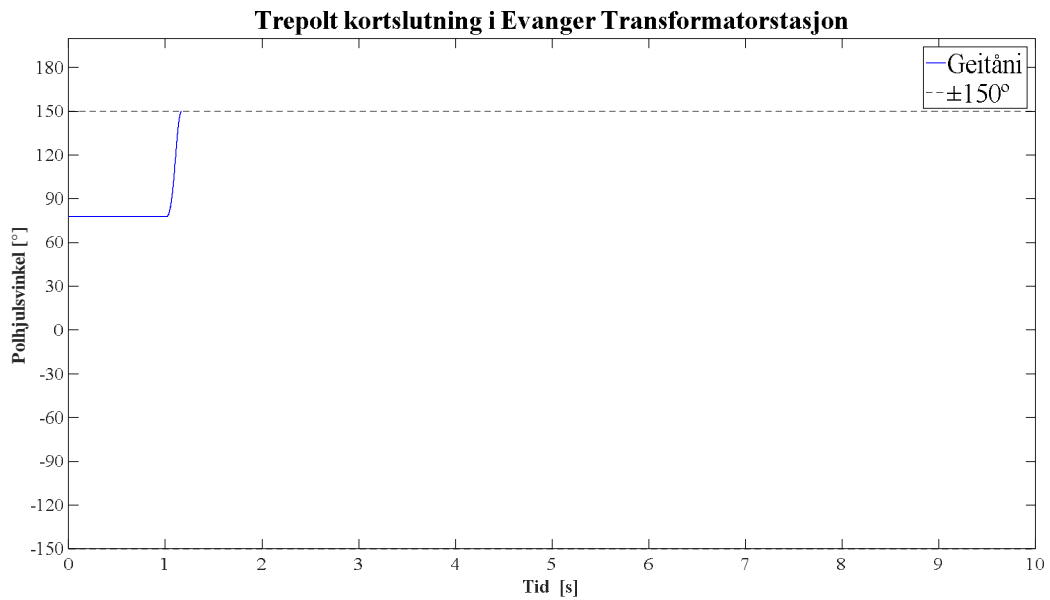
## Strøm



## Terminalspenning



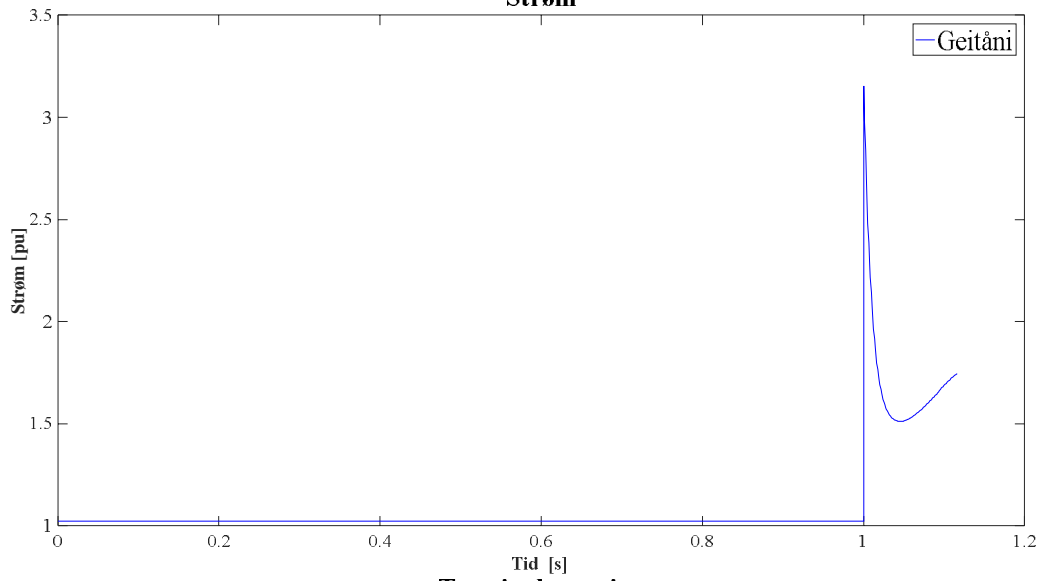
Vedlegg D.1.6 GEITÅNI KRAFTSTASJON



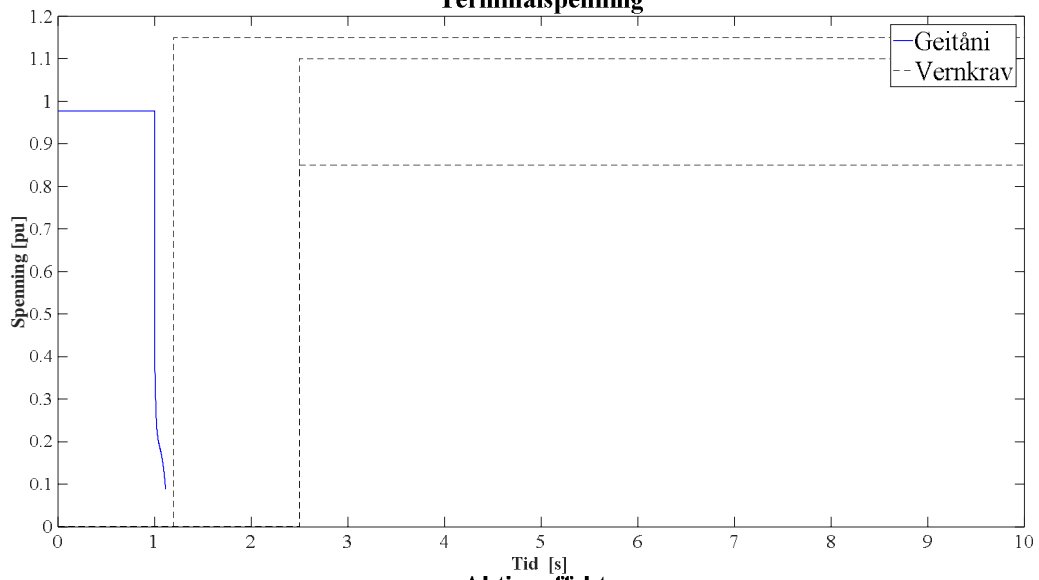


# Vedlegg

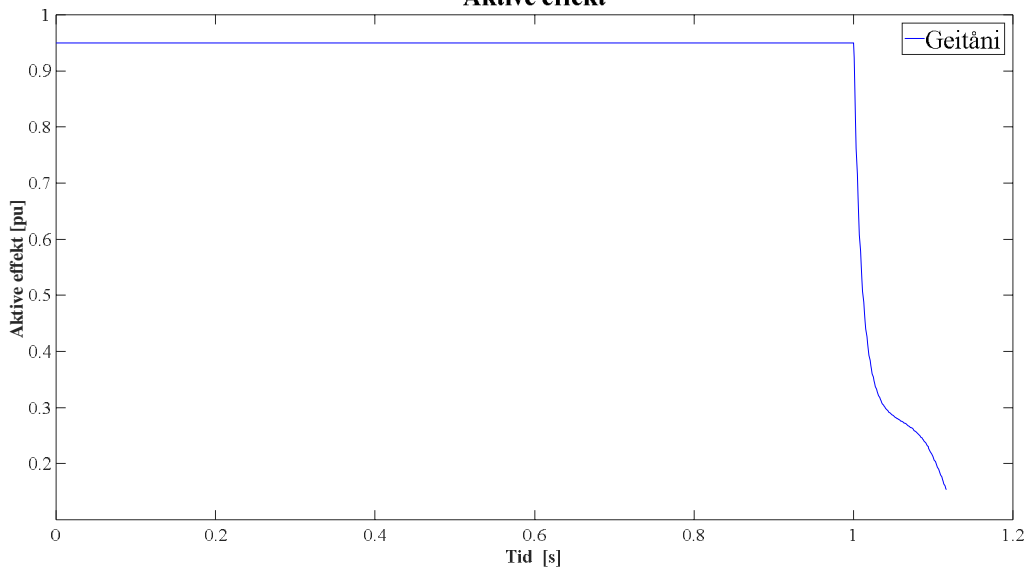
## Strøm



## Terminalspenning



## Aktive effekt



## Vedlegg

## Vedlegg D.2 RESULTAT FRA DEN STASJONÆRE ANALYSEN

## Vedlegg D.2.1 EGENVERDIER TIL EKSISTERENDE GENERATORER

MODI	FREKVENNS [HZ]	REL. DEMPING [%]	OMEGA [RAD/SEC]	SIGMA [RAD/SEC]	MASKIN
1	2.334	5.865	14.667	-0.862	Oksebotn kr.st.
2	2.842	7.930	17.857	-1.421	Furegardane kr.st.
3	4.241	6.308	26.648	-1.684	Rasdalen kr.st.
4	4.218	10.819	26.504	-2.884	Tverrgjuvlo kr.st.
5	3.585	21.299	22.528	-4.911	Vossadalselvi kr.st.
6	4.115	18.939	25.858	-4.988	Geitåni kr.st.
7	0.206	99.988	1.294	-84.804	Furegardane kr.st.
8	0.000	100.000	0.000	-0.040	Rasdalen kr.st.
9	0.000	100.000	0.000	-0.098	
10	0.000	100.000	0.000	-0.226	Tverrgjuvlo kr.st.
11	0.000	100.000	0.000	-0.379	Tverrgjuvlo kr.st.
12	0.000	100.000	0.000	-0.539	Vossadalselvi kr.st.
13	0.000	100.000	0.000	-0.689	Furegardane kr.st.
14	0.000	100.000	0.000	-0.833	
15	0.000	100.000	0.000	-0.833	
16	0.000	100.000	0.000	-0.833	
17	0.000	100.000	0.000	-0.833	
18	0.000	100.000	0.000	-0.833	
19	0.000	100.000	0.000	-1.025	Geitåni kr.st.
20	0.000	100.000	0.000	-2.000	
21	0.000	100.000	0.000	-6.102	
22	0.000	100.000	0.000	-10.000	
23	0.000	100.000	0.000	-10.000	
24	0.000	100.000	0.000	-10.000	
25	0.000	100.000	0.000	-10.000	
26	0.000	100.000	0.000	-10.000	
27	0.000	100.000	0.000	-10.000	
28	0.000	100.000	0.000	-10.000	

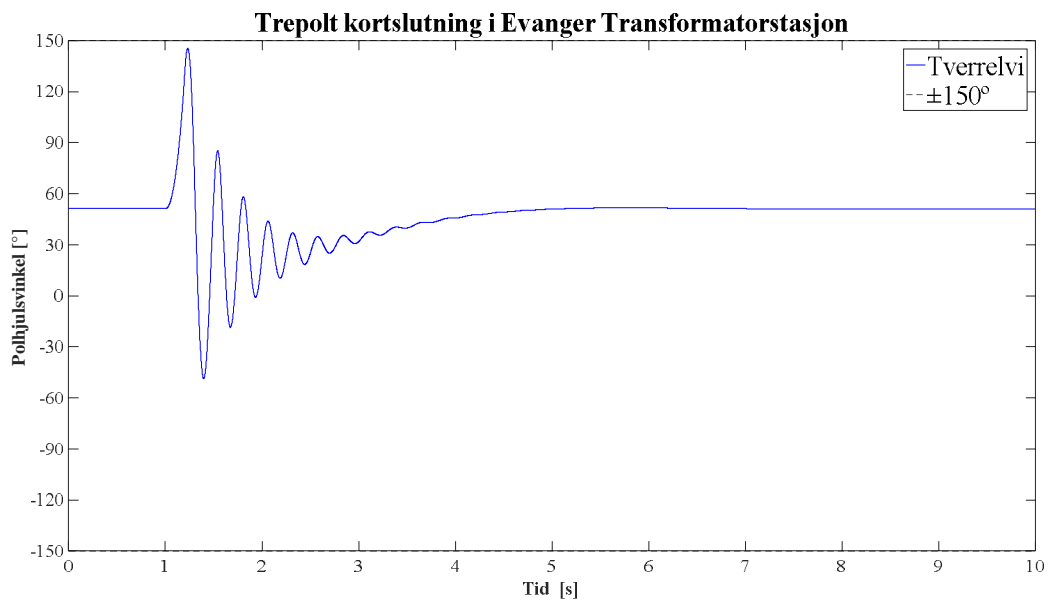
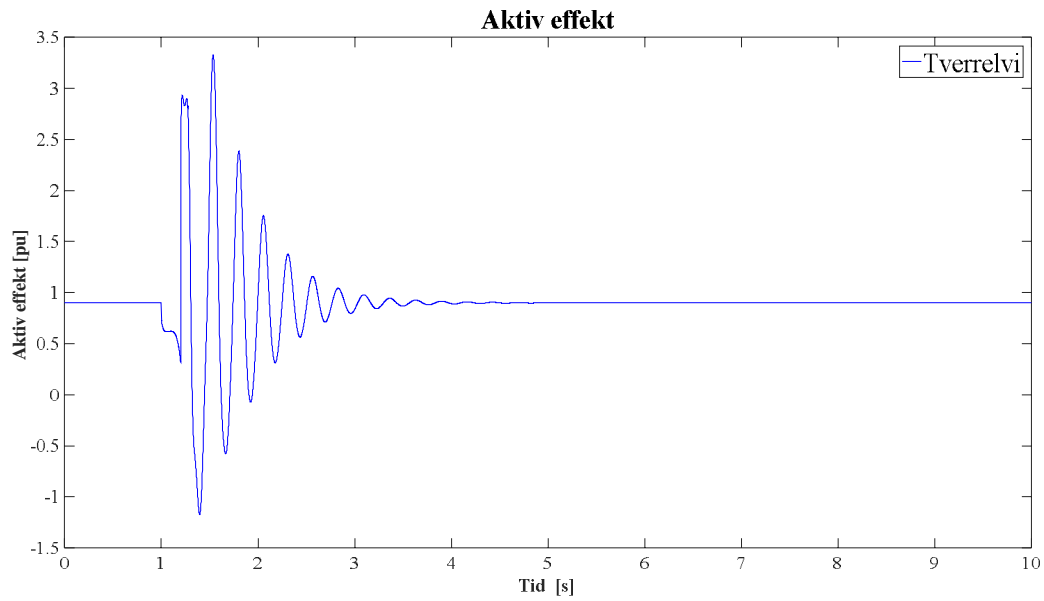
## Vedlegg E RESULTATER FRA STUDIER AV NYE GENERATORER

### Vedlegg E.1 PARAMETRE PÅ NYE GENERATORER

		TVERRELVI	TOGROVI	STORELVI	BJØRNDALEN	HJØRNEVIK
$P_N$	[kV]	4,4	3,3	3,3	2,3	2,5
$S_N$	[MVA]	4,89	3,67	3,67	2,56	2,78
n	[rpm]	750	750	750	750	750
$x_d$	[pu]	1,5	1,2	1,5	1,5	1,5
$x'_d$	[pu]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$x''_d$	[pu]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$x_q$	[pu]	1	1	1	1	1
$x'_q$	[pu]	1	1	1	1	1
$x''_q$	[pu]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$T'_d$	[s]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$T''_d$	[s]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$T'''_d$	[s]	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
H	[Ws/Va]	0,6	0,8	0,6	0,6	0,4
J	[kgm <sup>2</sup> ]	952	952	238	497	360

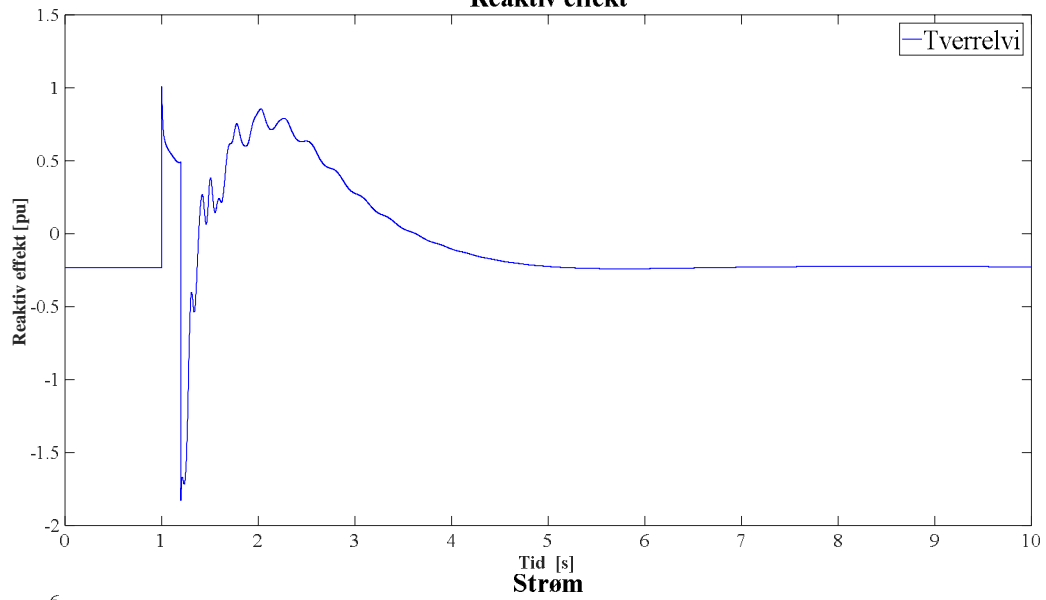
## Vedlegg E.2 RESULTATER FRA DEN TRANSIENTE ANALYSEN

### Vedlegg E.2.1 TVERRELVI KRAFTSTASJON

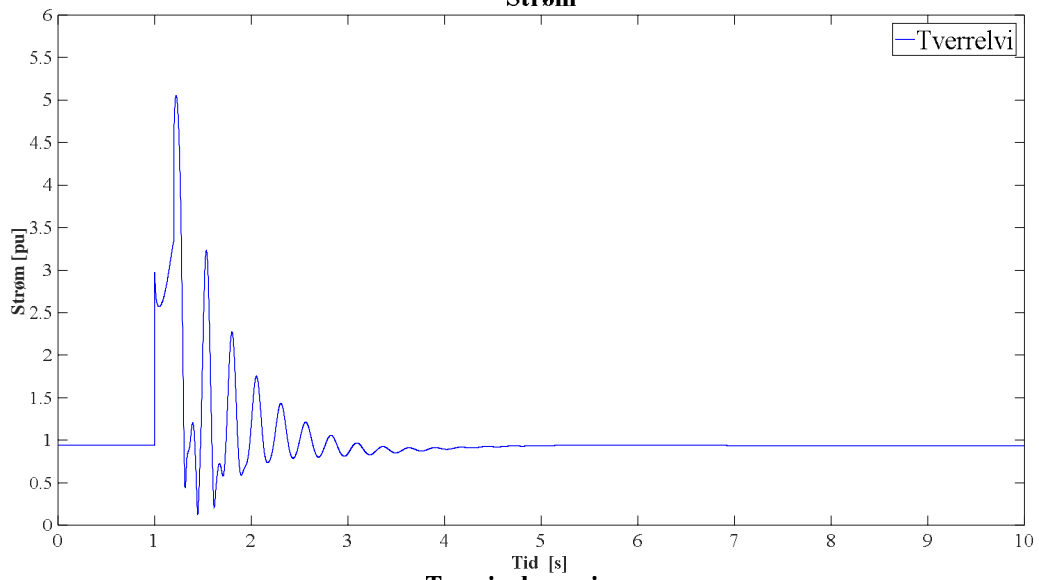


# Vedlegg

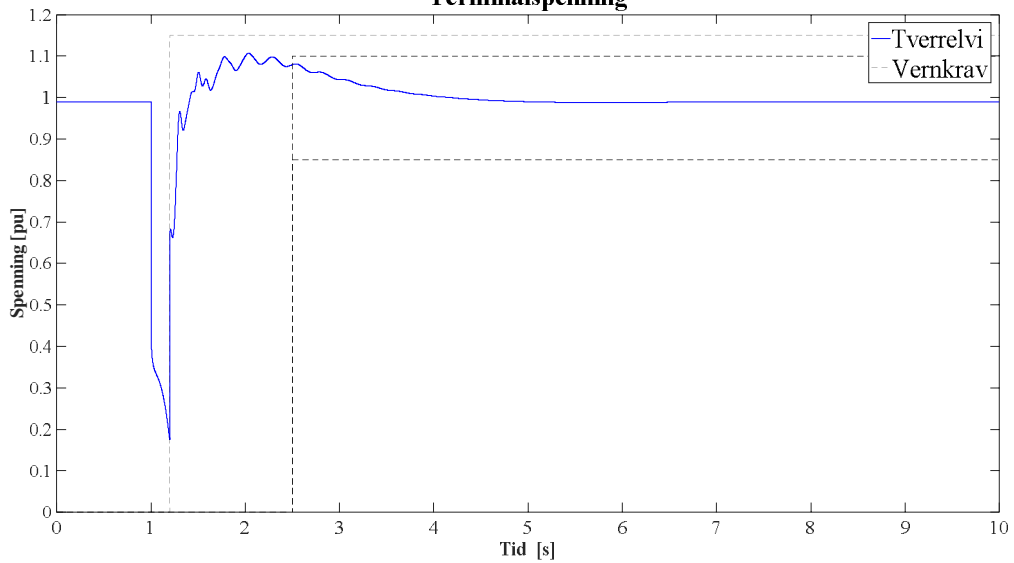
## Reaktiv effekt



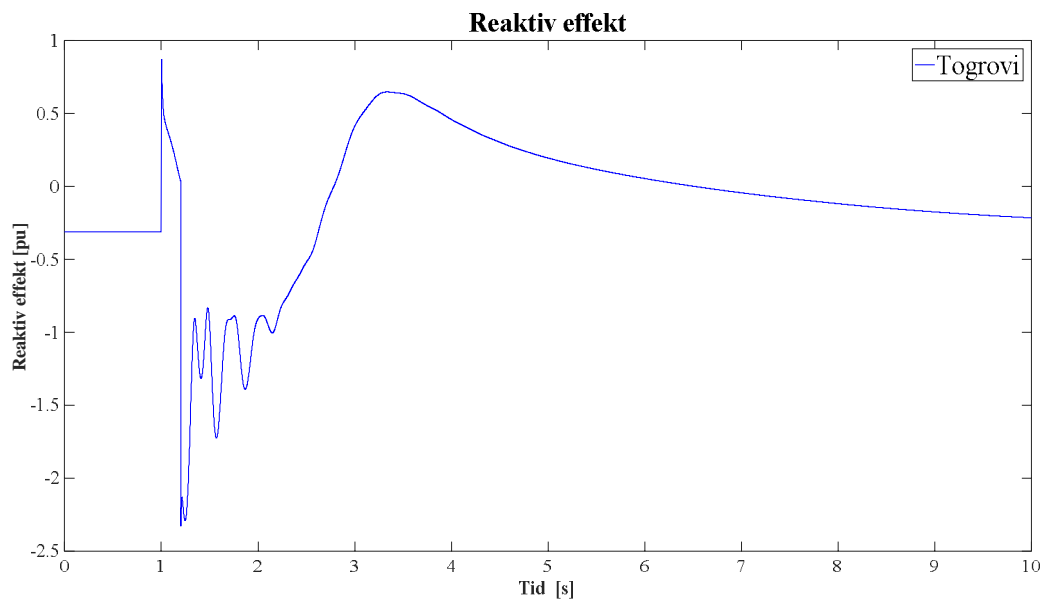
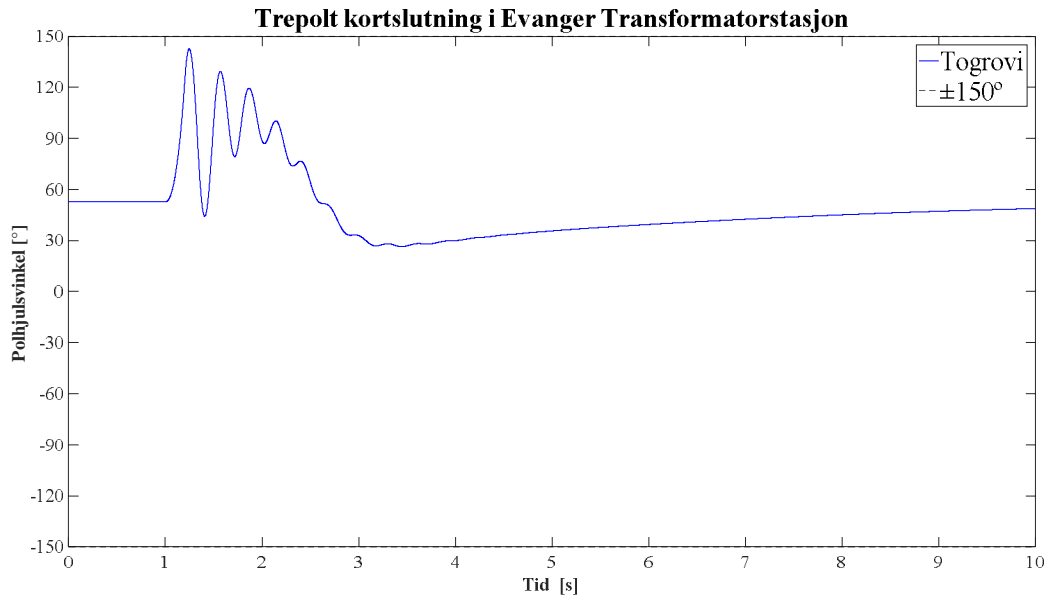
## Strøm



## Terminalspenning

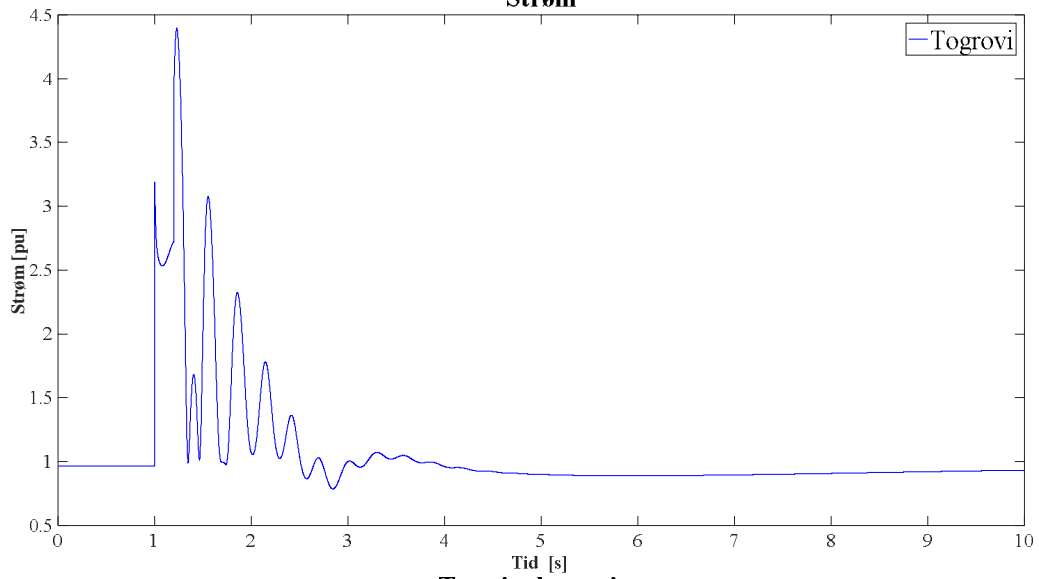


Vedlegg E.2.2 TOGROVI KRAFTSTASJON

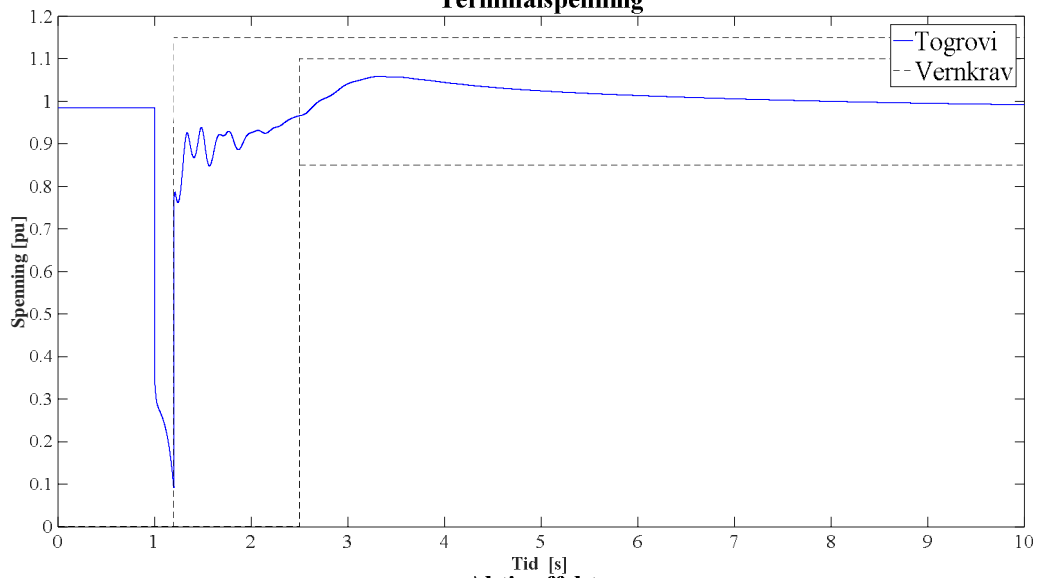


# Vedlegg

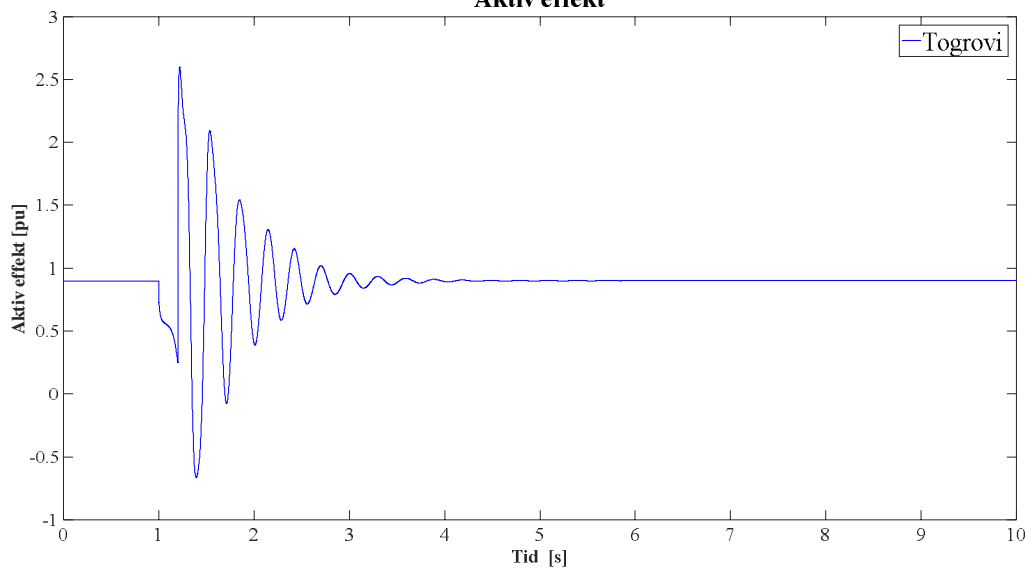
## Strøm



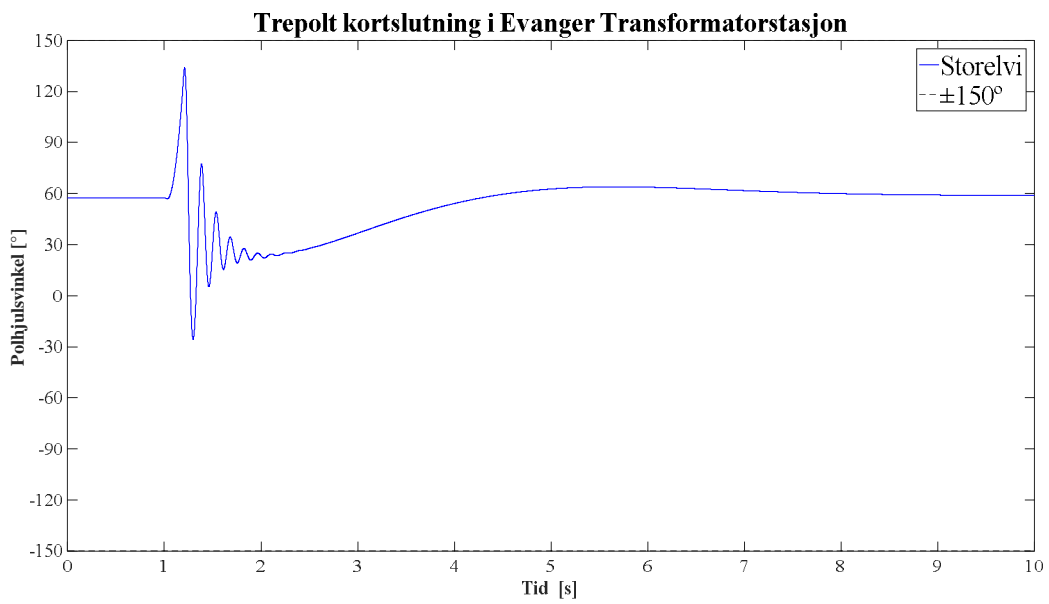
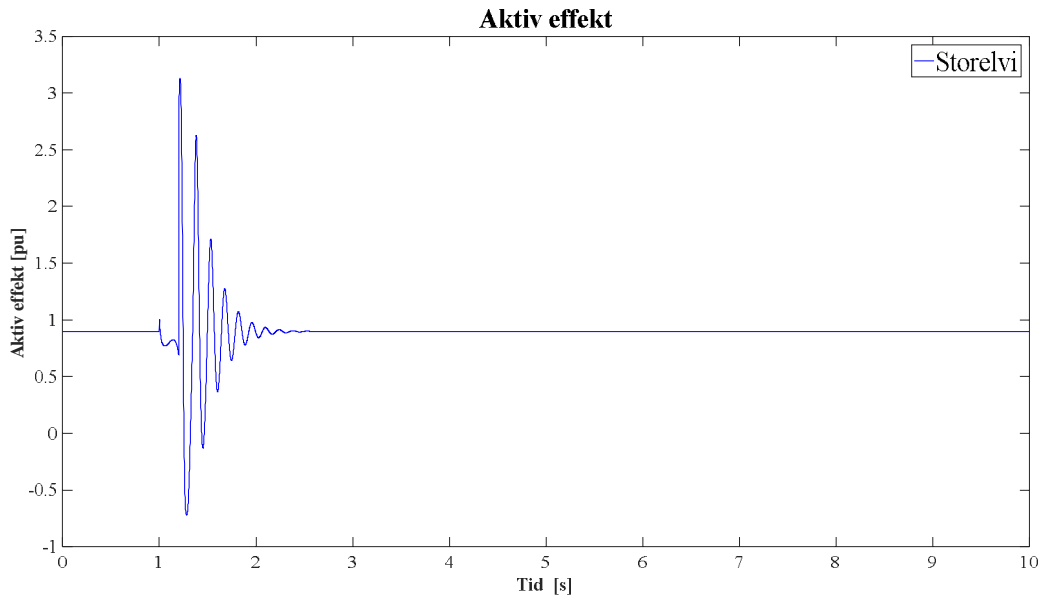
## Terminalspenning



## Aktiv effekt



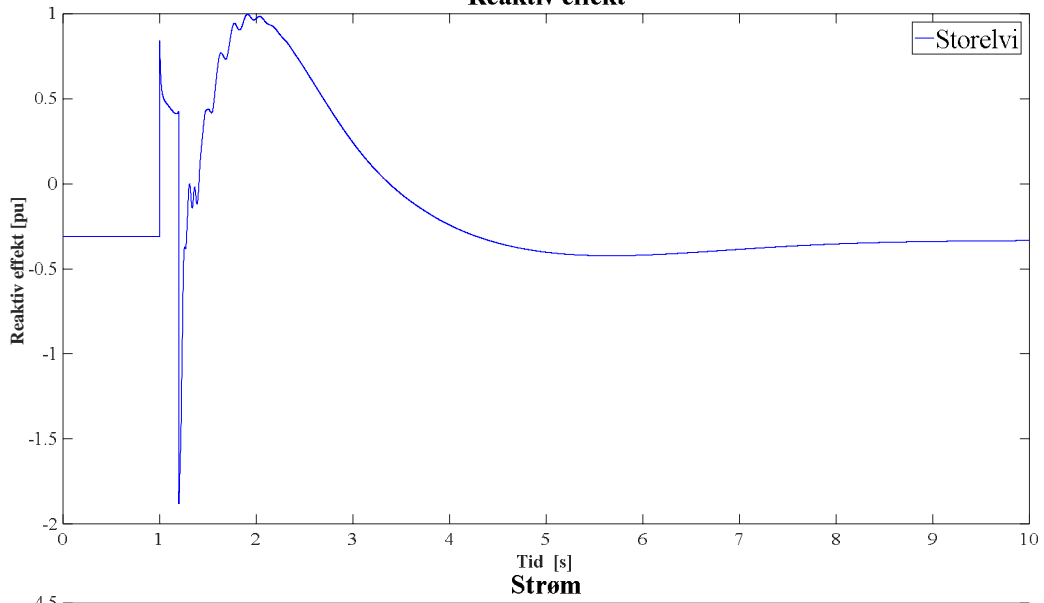
Vedlegg E.2.3 STORELVI KRAFTSTASJON



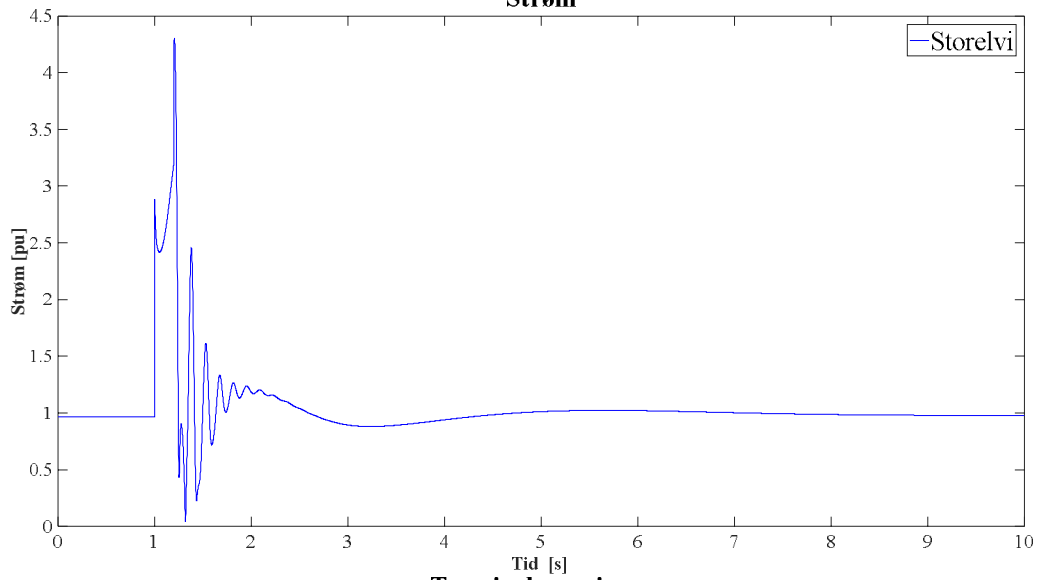


# Vedlegg

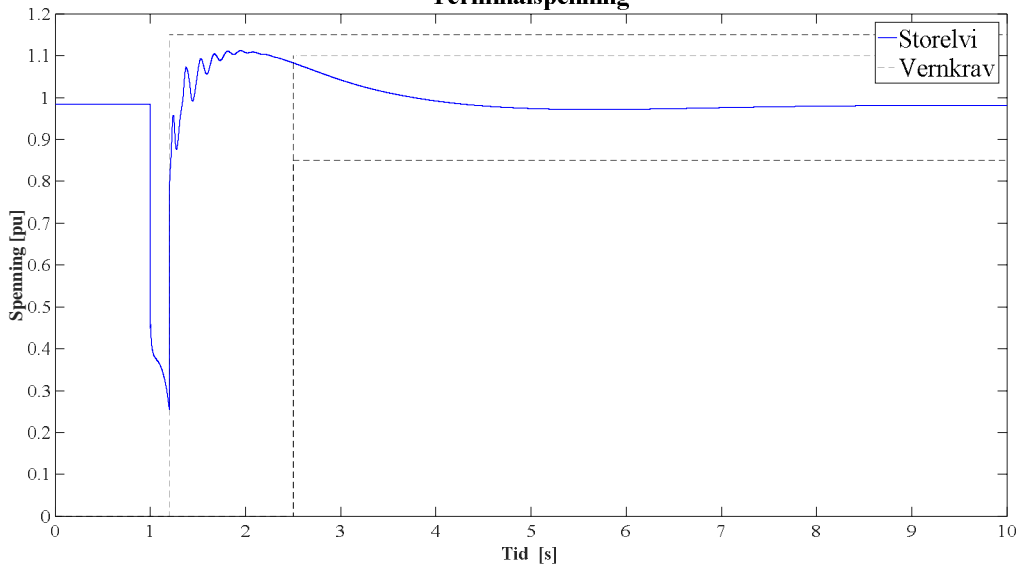
## Reaktiv effekt



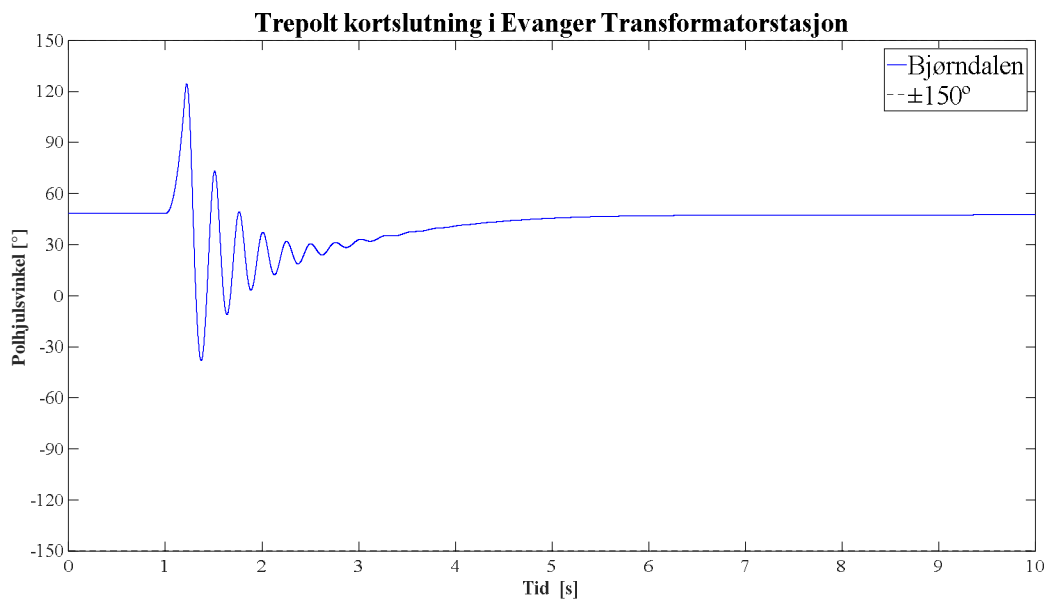
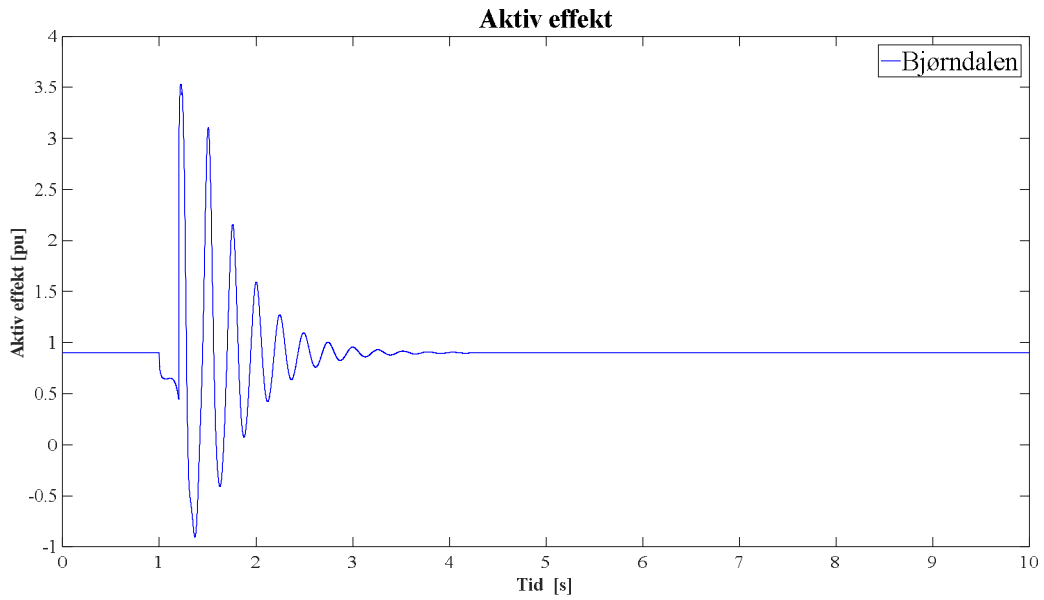
## Strøm



## Terminalspenning

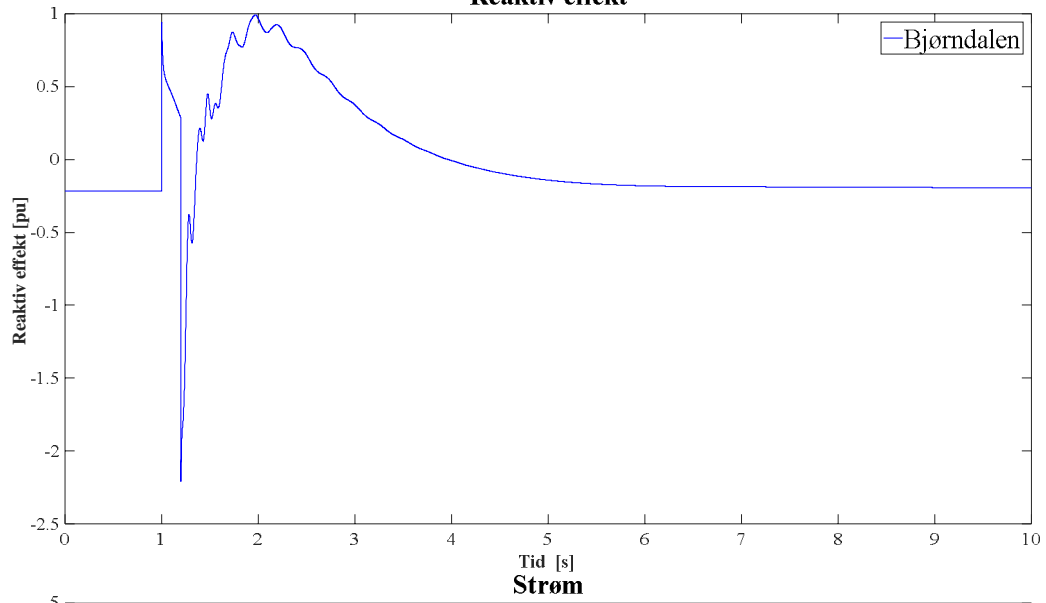


Vedlegg E.2.4 BJØRNDALEN KRAFTSTASJON

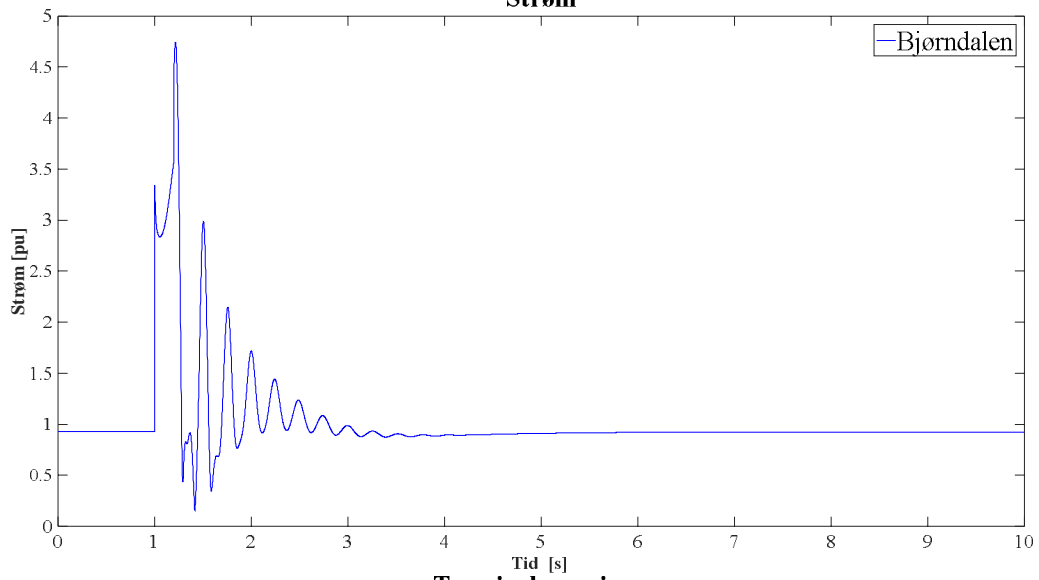


# Vedlegg

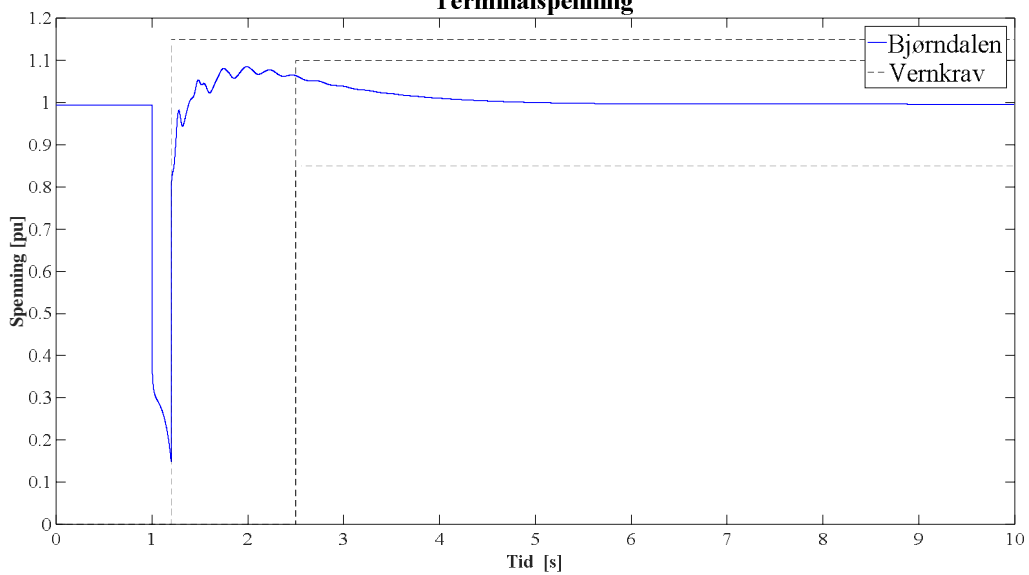
## Reaktiv effekt



## Strøm

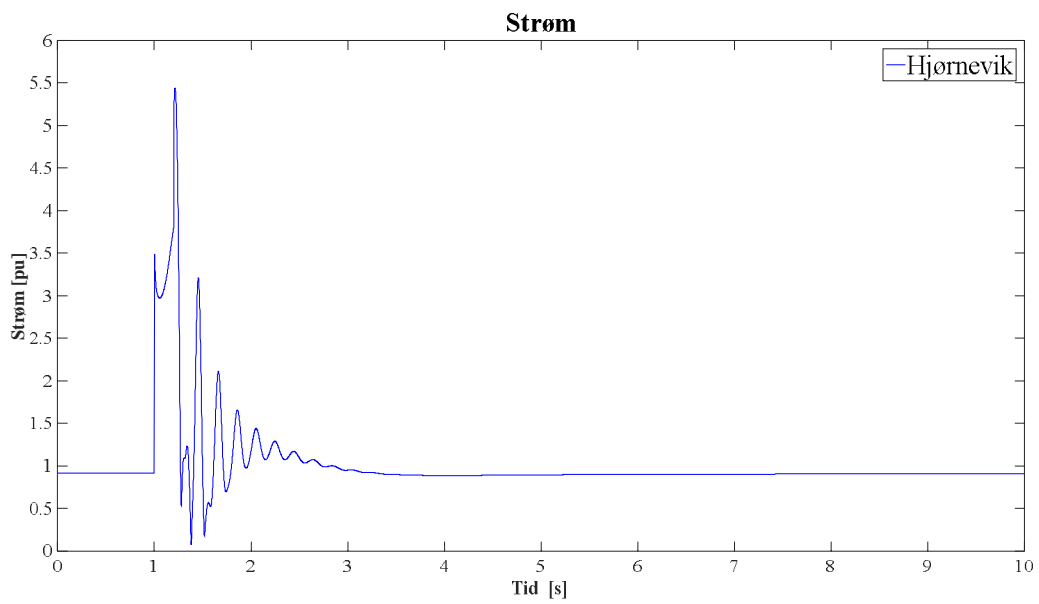
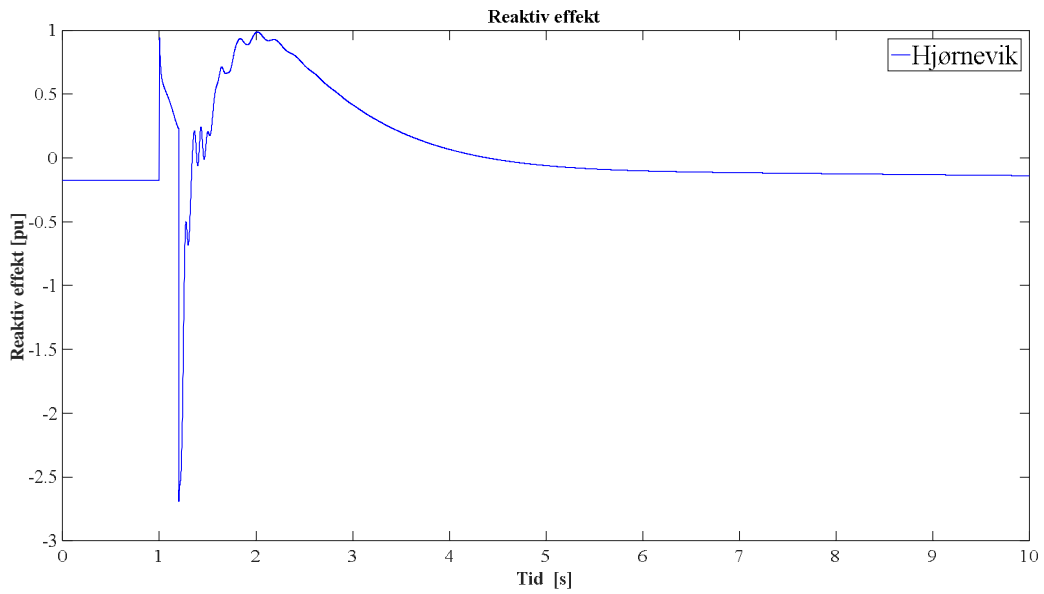


## Terminalspenning



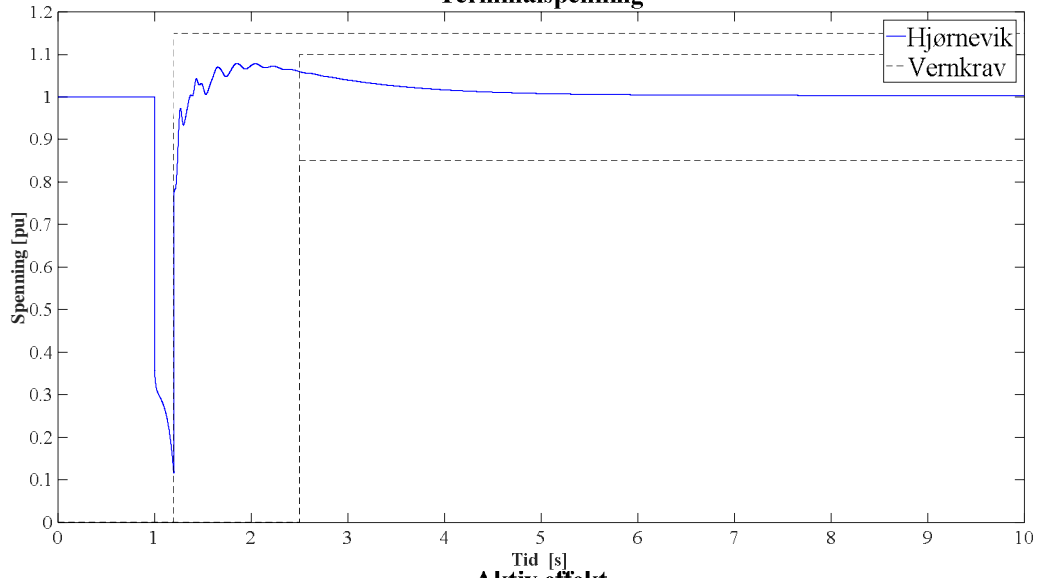
Vedlegg

Vedlegg E.2.5 HJØRNEVIK KRAFTSTASJON

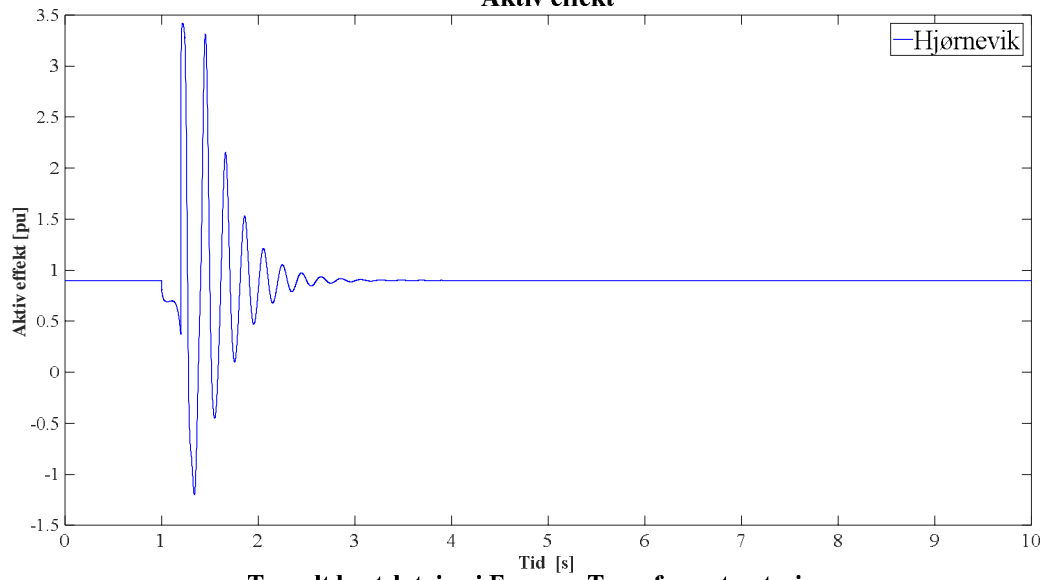


# Vedlegg

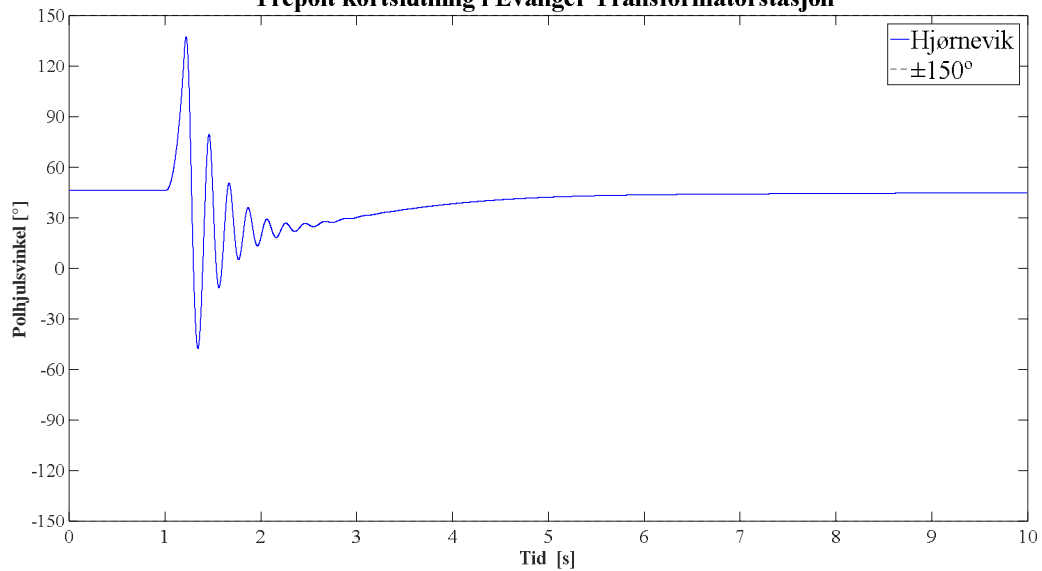
## Terminalspenning



## Aktiv effekt



## Trepolt kortslutning i Evanger Transformatorstasjon



Vedlegg

Vedlegg E.3 RESULTAT FRA DEN STASJONÆRE ANALYSEN

Vedlegg E.3.1 EGENVERDIER TIL EKSISTERENDE GENERATORER

MODI	FREKVENNS [HZ]	REL. DEMPING [%]	OMEGA [RAD/SEC]	SIGMA [RAD/SEC]	MASKIN
1	2.303	-5.670	14.468	-0.822	Oksebotn kr.st.
2	2.841	-7.925	17.851	-1.419	Furegardane kr.st.
3	4.244	-6.386	26.664	-1.706	Rasdalen kr.st.
4	3.438	-8.412	21.600	-1.824	Togrovi kr.st.
5	3.725	-9.357	23.407	-2.200	Tverrelvi kr.st.
6	3.953	-10.426	24.840	-2.604	Bjørndalen kr.st.
7	4.868	-10.403	30.586	-3.199	Hjørnevik kr.st.
8	6.900	-7.890	43.356	-3.432	Storelvi kr.st.
9	4.327	-14.102	27.184	-3.872	Tverrgjuvlo kr.st.
10	3.585	-21.333	22.525	-4.918	Vossadalselvi kr.st.
11	4.116	-18.857	25.864	-4.966	Geitåni kr.st.
12	0.197	-99.989	1.236	-84.973	Furegardane kr.st.
13	0.044	-99.999	0.277	-85.142	Tverrgjuvlo kr.st.
14	0.000	-100.000	0.000	-0.039	Rasdalen kr.st.

# Vedlegg F UTREGNING AV TREGHETSMOMENT FOR OKSEBOTN OG TVERRGJUVLO

## Vedlegg F.1 UTLEDNINGER AV GD2

$$GD^2[\text{kgf} \cdot \text{m}^2]$$

$$GD^2[9,807N \cdot \text{m}^2] \leftarrow \text{hvor } \text{kgf} = 9,807N$$

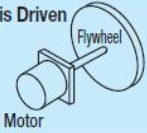
$$GD^2[9,807 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \cdot \text{m}^2] \leftarrow \text{hvor } 1N = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$$

$$GD^2[9,807 \cdot \text{m}/\text{s}^2 \cdot \text{kg} \text{ m}^2]$$

$$GD^2[g \cdot \text{kg} \text{ m}^2] \leftarrow \text{hvor } 9,807 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = g$$

$$\Rightarrow \boxed{GD^2[\text{kgf} \cdot \text{m}^2] = g \cdot GD^2[\text{kg} \text{ m}^2]}$$

Fra [24] er sammenheng mellom er momentligningene som følgende:

 <p>When Inertial Object is Driven Motor</p>	$T = \frac{J}{9.55 \times 10^4} \cdot \frac{N}{t} \text{ [N} \cdot \text{m]}$ <p>N : Rotational Speed [r/min] J : Inertia [kg·cm<sup>2</sup>] t : Time [sec.]</p>	$T = \frac{GD^2}{375 \times 10^4} \cdot \frac{N}{t} \text{ [kgf} \cdot \text{m]}$ <p>N : Rotational Speed [r/min] GD<sup>2</sup>: Flywheel Effect [kgf · cm<sup>2</sup>] t : Time [sec.]</p>
--	---	--

$$\frac{J}{9.55 \cdot 10^4} \cdot \frac{N}{t} = \frac{GD^2}{375 \cdot 10^4} \cdot \frac{N}{t}$$

$$\frac{J}{9.55 \cdot 10^4} \cdot \frac{N}{t} = \frac{GD^2}{375 \cdot 10^4} \cdot \frac{N}{t}$$

$$\Rightarrow J[\text{kg} \cdot \text{cm}^2] = \frac{9,55}{375} GD^2[\text{kgf} \cdot \text{cm}^2] \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{cm}^2}$$

$$\Rightarrow \boxed{J[\text{kg} \cdot \text{m}^2] = \frac{9,55}{375} GD^2[\text{kgf} \cdot \text{m}^2]}$$

Eller

$$J[\text{kg} \cdot \text{m}^2] = \frac{9,55}{375} g \cdot GD^2[\text{kg} \text{ m}^2] = \frac{9,55}{375} \cdot 9,807 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot GD^2[\text{kg} \text{ m}^2]$$

$$\Rightarrow \boxed{J[\text{kg} \cdot \text{m}^2] = \frac{GD^2[\text{kg} \text{ m}^2]}{4}}$$

Som gir mening når forholdet mellom kvadratet av diameter D og radius r er (J er regnet ut av radius):

$$D^2 = (2r)^2 = 4r^2$$

## Vedlegg F.2 UTREGNING AV TREGHET TIL TVERRGJUVLO OG OKSEBOTN

	TVERRGJUVLO	OKSEBOTN
Merkeytelse [MVA]	5,917	12,2
Merketurtall [rpm]	1000	600
Svingmoment [kgm <sup>2</sup> ]	2210	25500

$$J_{Tverrgjuvlo} = \frac{GD^2[\text{kg} \cdot \text{m}^2]}{4} = \frac{2,21 \cdot 10^3}{4} [\text{kg} \cdot \text{m}^2] = 552,5 [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$J_{Oksebotn} = \frac{GD^2[\text{kg} \cdot \text{m}^2]}{4} = \frac{25,5 \cdot 10^3}{4} [\text{kg} \cdot \text{m}^2] = 6375 [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

Dette gir H konstant:

$$H_{Tverrgjuvlo} = \frac{\frac{1}{2}J\omega^2}{S_n} = \frac{J \cdot \left(n \cdot \frac{2\pi}{60}\right)^2}{2 \cdot S_n} = \frac{552,5 \text{ kgm}^2 \cdot \left(1000 \text{ rpm} \cdot \frac{2\pi}{60}\right)^2}{2 \cdot 5,917 \text{ MVA}} = 0,512 \text{ s}$$

$$H_{Oksebotn} = \frac{\frac{1}{2}J\omega^2}{S_n} = \frac{J \cdot \left(n \cdot \frac{2\pi}{60}\right)^2}{2 \cdot S_n} = \frac{6375 \text{ kgm}^2 \cdot \left(600 \text{ rpm} \cdot \frac{2\pi}{60}\right)^2}{2 \cdot 12,2 \text{ MVA}} = 1,0314 \text{ s}$$



