



UIT

NORGES
ARKTISKE
UNIVERSITET

Institutt for elektroteknologi

Rammeverk for modellering og simulering av husholdningsapparater

Diplomoppgave

—

Forfatter: Christian Bjerknes Nilsen

Masteroppgave i elektroteknikk

SHO6262, 11 juni 2018

UiT Norges arktiske universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi



<i>Tittel (norsk): Rammeverk for modellering og simulering av husholdningsapparater</i>	<i>Dato: 11.juni.2018</i>
<i>Title (english): Framework for modelling and simulation of household appliances</i>	<i>Gradering: Åpen</i>
<i>Kandidat nummer: 530775</i>	<i>Antall sider: 93</i>
<i>Veileder: Bjarte Hoff</i>	<i>Vedlegg: 1</i>

<i>Oppdragsgiver: UiT Norges arktiske universitet, institutt for elektroteknologi</i>
<i>Oppdragsgivers kontaktperson: Bjarte Hoff</i>

Sammendrag:

Denne oppgaven har hatt til hensikt å utarbeide et rammeverk for modellering og simulering av husholdningsapparater i Simulink, hvor det er muligheter for sammenkobling av flere enheter basert på typisk utstyr i norske husholdninger. Videre er en litteraturstudie av ulike typer utstyr, og disse er kategorisert basert på sine karakteristikk, samt at det er satt opp krav til de ulike simuleringene. Et utvalg simulerte apparater er verifisert gjennom eksperimenter, og resultatene viste samsvar med målte verdier på laboratoriet.

Abstract:

The building of a framework for simulating household appliances in Simulink is the focus of this report. The framework provides possibilities for connecting multiple units based on typical equipment in Norwegian households in connected grids and isolated grids. Furthermore, a literature study has been done, and categorized equipment based on their characteristics, as well as the requirements for the various simulations. A few of the simulated appliances are verified with experiments, which show good compliance with measured values in the laboratory.

Sammendrag

Denne oppgaven har hatt til hensikt å utarbeide et rammeverk for modellering og simulering av husholdningsapparater i Simulink, hvor det er muligheter for sammenkobling av flere enheter basert på typiske utstyr i norske husholdninger. Tilkoblingen av modellene kan være via TN-nett, IT-nett eller andre mindre kilder i Simulink.

Videre er det gjennomført en litteraturstudie av ulike typer utstyr og flere modelleringsmetoder for husholdningsapparater er betraktet. Utstyret som kan tilkobles de norske husholdninger er kategorisert basert på deres karakteristikker. Fra denne kategoriseringen er det gjennomført analyse på lasttypene og satt opp krav til de ulike simuleringene.

Deretter ble spenningsvariasjon introdusert og konstant impedanse/strøm/effekt modell ble verifisert for å kompensere for endring i spenning hos modellene. Rammeverkets struktur for den generelle lastmodellen er oppbygd basert på innhenting av koeffisienter via «fast fourier transform», som er den valgte metoden for parameterestimeringen av utstyrets egenskaper til fourier-rekken. Koeffisientene som lagres i dette biblioteket, velges via dialogvinduet i modellene etter ønsket husholdningsapparat som skal simuleres. En annen modell ble også utviklet på grunnlag av at den skilte seg fra de andre lasttypene i husholdningen. Impedanslastmodellens forskjell og den andre modellen, er at den utfører beregninger i Simulink blokken basert på resistans og reaktans som bruker fyller inn.

Beskrivelse av simuleringers hensikt, ulike oppløsninger og løsning på simuleringer er utført. Avslutningsvis ble et utvalg simulerte apparater verifisert med eksperimenter. Elektrisk utstyr ble målt og simulert for hvert enkelt utstyr, men også sammenkoblet med flere husholdningsapparater. Resultatet fra verifikasjonen viste godt samsvar mellom simulerte utstyr og målte utstyr på laboratoriet.

Forord

Oppgaven er gitt av UiT, Norges arktiske universitet ved instituttet for elektroteknologi. Bjarte Hoff som har laget oppgaven «Modellering av husholdningsapparater,» og er også veileder. Jeg valgte dette emnet på grunn av at det introduserte meg til et nytt tema, modellering i Simulink, som jeg i liten grad hadde jobbet med før denne Diplomoppgaven. For meg var selve motivasjonen bak denne oppgaven det å kunne sette seg inn i karakteristiske egenskapene til utstyr tilknyttet husholdningsapparater igjennom en litteraturstudie. Dette på grunn av at det er en økning av elektroniske utstyr som tilkobles lavspenningsnettet i husholdningen.

I forbindelse med min avhandling ønsker jeg å takke de som har bidratt og hjulpet meg igjennom denne prosessen. Den første jeg ønsker å takke er min veileder, Doktor Bjarte Hoff, og gi han en stor takk for hans hjelpelighet og innsikt i emnet som har vært helt nødvendig igjennom arbeidet. Videre ønsker jeg også å takke Doktor Trond Østrem ved UiT Narvik for gode råd. For tilgang og hjelp på laboratoriet har Johnny Tokle vært til støtte. Min familie og mine venner har også bidratt positivt igjennom denne perioden.

Diplomoppgaven er avsluttende del av masterutdanningen og utgjør 30 av totalt 120 studiepoeng. I denne rapporten skal man ta for seg emnekode SH06262, diplomoppgaven for masterutdanningen. Før jeg startet på arbeidet ble det gjennomført et forprosjekt, som er vektlagt 5 studiepoeng og gjennomført på høst semesteret 2017. Forprosjektet var første tilnærmingen til hovedprosjektet der jeg skulle sette meg inn i de vesentligste problemstillingene og planlegge gjennomføringen av prosjektet. Man skal ikke starte konkret på selve oppgaven, men definere målet med prosjektet, avgrensinger som er betraktet og utarbeide en plan for hvordan man skal jobbe videre med selve oppgaven. Litteraturstudie ble også startet på, med formål om å finne relevant litteratur som skulle støtte oppgaven og øke dens relevans innenfor fagfeltet. Når planleggingen av diplomoppgaven ble gjort i desember, ble det planlagt at arbeidet skulle begynne januar, og at avhandlingen skulle ferdigstilles i juni 2018.

Sted og dato

Narvik den 11.06.2018

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	ii
Forord	iii
Figurliste	viii
Tabelliste	x
Forkortelser og notasjoner	x
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Avgrensninger	1
1.3 Problemformulering og hovedmål	2
1.4 Forskningsspørsmål	2
1.5 Oversikt over avhandlingen.....	3
2 Teori og litteraturstudie.....	4
2.1 Tidligere forskning.....	4
2.1.1 Beskrivelse av relevante artikler	4
2.1.2 Gjennomgang av utvalgte relevante artikler	5
2.1.3 Gjennomgang av relevante masteroppgaver.....	8
2.2 Modelleringsmetoder	9
2.2.1 Detaljemodellering for hvert enkelt utstyr	9
2.2.2 Lineære modeller	10
2.2.3 Ulineære modeller	12
2.2.4 Dekomponeringer av forvrengte kurveformer ved fourier rekke	13
2.3 Lavspente fordelingsystemer.....	14
2.3.1 IT-nett.....	15
2.3.2 TN-nett.....	16
2.3.3 Bruken av TN-og IT nett i husholdningers modell.....	16
2.3.4 TN-nett strøm i N-leder for husholdninger.....	17
2.4 Total Harmonisk Forvrengning (THD).....	17
2.5 Aktiv og reaktiv effekt.....	18
2.6 Energiforbruk i Norge	19
3 Kategorisering av belastningstyper og beskrivelse av deres karakteristikk.....	20
3.1 Enfase diodelikeretter med kondensator.....	21

3.2	Impedans belastninger	24
3.3	Faseinnsnitt- og faseavsnitt dimming.....	26
3.3.1	Faseinnsnitt dimming.....	26
3.3.2	Faseavsnitt dimming.....	28
3.4	Motordominerende belastninger.....	30
3.4.1	Universalmotoren	30
3.4.2	Enfaset asynkron motor; hjelpefasemotoren.....	32
3.5	Andre ulineære belastninger.....	33
4	Analyse av lasttypene og krav til simuleringer basert på utviklede modeller i Simulink	34
4.1	Analyse av likeretter	34
4.1.1	Matematisk modell i Simulink.....	34
4.1.2	Frekvensspekter relativ til den grunnharmoniske	35
4.1.3	Evaluering av antall overharmoniske ledd i rekonstruerte kurveform.....	36
4.2	Analyse av impedans belastninger.....	37
4.3	Analyse av faseinnsnitt dimming.....	38
4.3.1	Evaluering av antall overharmoniske ved en faseinnsnitt dimming krets med resisitiv belastning.....	38
4.4	Analyse av faseavsnitt dimming.....	40
4.4.1	Frekvensspekter relativ til den grunnharmoniske i faseavsnitt dimming ..	40
4.4.2	Faseavsnitt dimming med typisk likeretter belastning.....	40
4.5	Oppsummering og diskusjon.....	42
5	Spenningsvariasjon	43
5.1	Teori for spenningsvariasjon	43
5.2	Andvendte last modeller	44
5.2.1	Konstant Impedans/Strøm/Effekt	44
5.2.2	Konstant Impedans/Strøm/Effekt med hensyn på strømmens øyeblikksverdi.....	44
5.3	Påvirkning av spenningsvariasjoner på modellen	45
5.4	Verifikasjon av ZIP modellens kompensering ved spenningsvariasjon	46
6	Felles rammeverk for simulering	48
6.1	Matematisk beskrivelse av modellene.....	48
6.2	Introduksjon til de konstruerte modellene	49

6.3	Den generelle last modellen.....	50
6.3.1	Oppsett på lagring og innhenting av utstyrs koeffisienter	51
6.3.2	Modellens struktur	54
6.3.3	Fcn Matlab function (minfunksjon)	54
6.3.4	Utdypende beskrivelse av innganger(input).....	55
6.3.5	Utdypende beskrivelse av utganger(output)	55
6.3.6	Dialogvindu valg.....	56
6.4	Impedans last modell	58
6.4.1	Modellens struktur	58
6.4.2	Dialogvindu.....	58
6.5	Bruken av $I_{kontroll}$ for regulering av modellenes nivå	60
6.6	Modellering av utstyr med ulike sekvenser.....	60
6.7	Simulering og krav.....	61
6.7.1	Ønsket oppnåelse med simuleringen og over ulike tidperiodsperioder	61
6.7.2	Simuleringens sampligens tidssteg T_{s1} for generell lastmodellene.....	62
6.7.3	Simuleringens sampligens tidssteg T_{s2} for impedans lastmodellene	62
6.7.4	Frame- and sample-based processing.....	63
6.8	Forklaring til ulike typer styring for simulering.....	66
6.8.1	Modell kompatibel for eksternt inngangssignal.....	66
6.8.2	Videre utvikling av kontroll inngangssignal	66
6.8.3	Tilleggsfunksjoner; av, på eller andre funksjoner til ulike utstyrene	66
6.9	Forslag til struktur i Simulink for simulering av flere utstyr	67
7	Verifikasjon med eksperiment.....	70
7.1	Eksperimentelt oppsett på laboratoriet.....	70
7.2	Prosedyrer for målinger, innstillinger oscilloskop og innhenting av koeffisienter	71
7.2.1	Oppkobling av eksperiment	71
7.2.2	Framgangsmåte for måling ved bruk av oscilloskopet.....	72
7.2.3	Beskrivelse av fft analyse og oppsett i Simulink/Matlab.....	73
7.3	Målte husholdningsapparater verifisert med modellen	75
7.4	Verifikasjon med flere utstyr tilkoblet.....	77
7.5	Oppsummering og resultater fra verifikasjon	78

8	Konklusjon og anbefalinger til videre arbeid.....	79
8.1	Konklusjon.....	79
8.2	Anbefalinger til videre arbeid	80
	Referanser	81
	Vedlegg	82
	Vedlegg A – Zip fil - Matlab koder, Simulink modellen, relevante vurderinger.....	82

Figurliste

Figur 2-1 Last profiler i kW; a) oppvaskmaskin b) vaskmaskin & tørketrommel c) kjøleskap d) ovn om morgenen e) ovn om kvelden f) elektrisk bil, [11] [9].	6
Figur 2-2 Validering av parameterestimering av 14-W Philips CFL modell, der AC-urveformer av målte og estimerte strømkurve sammenlignes[3].	7
Figur 2-3 Spenning- og strømkurve for lineære last.	10
Figur 2-4 Lineær krets spenning-og strøm forhold.	10
Figur 2-5 Spenning- og strømkurve for ulineære last.	12
Figur 2-6 IT-nett.	15
Figur 2-7 TN-nett.	16
Figur 2-8 Sinusbølgeform med positiv- og negativ faseforskyvning.	18
Figur 3-1 Viser enfase diodelikeretter med kondensator.	21
Figur 3-2 Grunnleggende likeretter omformere AC-DC [21].	21
Figur 3-3 Overharmonisk spektrum til strømmen tilført enfaset diodelikeretter med kondensator[16].	22
Figur 3-4 Spenning og strømkurve for likeretter med en konstant DC-spenningsside [22].	22
Figur 3-5 Kurveform fra en praktisk diodelikeretter med kondensator simulert i Pspice og den bergnete grunnharmoniske strømkomponenten er vist [22].	23
Figur 3-6 Forvrengninger av strømkurvene til diodelikeretteren påvirker den tilførte spenningen.	23
Figur 3-7 Kurveform til en typisk impedans last som er induktiv.	24
Figur 3-8 Generell serie-og parallell kobling av resistans, induktans og kapasitans.	24
Figur 3-9 Faseinnsnitt dimming ekvivalent med R eller RL belastning.	26
Figur 3-10 Faseinnsnitt dimming prinsipp spenning- og strømkurve (ren ideell resistiv last).	27
Figur 3-11 Faseinnsnitt dimming prinsipp spenning- og strømkurve for RL last.	27
Figur 3-12 Faseavsnitt dimming prinsipp spenning- og strømkurve (ren ideell resistiv last).	28
Figur 3-13 Utvikling lyskildeeffektivitet til flere ulike typer [24].	29
Figur 3-14 Universalmotoren 1) symboltegn 1 2) symboltegn 2	30
Figur 3-15 Skjema for universalmotoren.	31
Figur 3-16 Målt strømkurven til en vifte på 36W.	32
Figur 3-17 Motstandsstart av en faset asynkronmotor. a) Kobling b) Viserdiagram ved start.	32
Figur 3-18 Enfasemotor med kondensator. a) Med startkondensator b) Viserdiagram for motor med startkondensator. c) Motor med permanent kondensator.	33
Figur 3-19 Strømkurve til målt mikrobølgeovn på 1,15 kW.	33
Figur 4-1 Matematisk modell til likeretter.	34
Figur 4-2 Frekvensspekteret til den simulerte enfasediodelikeretter.	35
Figur 4-3 Viser antall overharmoniske; a) 250Hz, b) 500Hz, c) 750 Hz.	36

Figur 4-4 Viser avvik og feil opptil 15 overharmoniske relativ til strømmen.	37
Figur 4-5 Sinusbølgeform med positiv- og negativ faseforskyvning.....	37
Figur 4-6 Viser antall overharmoniske; a) 500 Hz, b) 750Hz, c) 1000 Hz.	38
Figur 4-7 Viser kvadratisk og kumulativt avvik opptil 25 overharmoniske.	39
Figur 4-8 Frekvensspekteret til den simulerte faseavsnitt enfasediodelikeretter.	40
Figur 4-9 Faseavsnitt kontroll i simulering.....	41
Figur 4-10 Viser antall overharmoniske; a) 750Hz, b) 1000Hz, c) 1250 Hz.	41
Figur 4-11 Viser avvik og feil opptil 30 overharmoniske.	42
Figur 5-1 Spenning karakteristikk for: (a) lyspære; (b) utladende belysning.....	43
Figur 5-2 Simulerte avvik relativ til strømmens rms ved ulike spenningsnivå.	46
Figur 5-3 Verifikasjon av respondans på strømmens ZIP-modellen ved endring i spenning fra 230V til 207V, a) viser for konstant impedans, b) viser konstant strøm, c) er konstant effekt.....	47
Figur 6-1 Modell ramme for generell-og impedans lastmodell, utgang rms-verdi og fasevinkelen.....	50
Figur 6-2 Modell ramme for generell-og impedans lastmodell, utgang strømkurve.....	50
Figur 6-3 Logisk kobling mellom tabeller i Simulink.	53
Figur 6-4 Fcn Matlab function.	54
Figur 6-5 Subsystem(mask)/dialogvindu for den generelle lastmodellen.....	57
Figur 6-6 Popup edit felt i dialogvindu for ZIP koeffisienter.....	58
Figur 6-7 Subsystem(mask)/dialogvindu for impedanslastmodell.	59
Figur 6-8 Sekvensskjema for en oppvaskmaskin[30].....	60
Figur 6-9 Blokkdiagram for modeller med sekvens kontroll.....	61
Figur 6-10 Frame-based processing.	63
Figur 6-11 Sample-based processing.....	64
Figur 6-12 Frame based IFFT i Simulink.....	65
Figur 6-13 Simuleringsresultat for en periode ved framed based IFFT.....	65
Figur 6-14 Forslag til oppkoling av TN-nett.	68
Figur 6-15 Forslag til oppkobling IT-nett.	69
Figur 7-1 Oppkolingskjema på laboratoriet.....	71
Figur 7-2 Tangamperemeter til venstre, voltmeter til høyre.....	72
Figur 7-3 Eksempel på korrekte innstillinger på oscilloskop.	73
Figur 7-4 Script for FFT og oppsett til modellene.....	74
Figur 7-5 Simulert likeretterlast sammenlignet med målt likeretterlast på laboratoriet.	75
Figur 7-6 Simulert mikrobølgeovn(1,15kW) sammenlignet med målt mikrobølgeovn(1,15kW) på laboratoriet.....	76
Figur 7-7 Simulert vifte(36W) sammenlignet med målt vifte(36W) på laboratoriet.....	77
Figur 7-8 Simulert vifte og likeretter sammenlignet målt vifte og likeretter på laboratoriet.	78

Tabelliste

Tabell 2-1 Reduksjonsfaktor og overharmoniske strømmer i 4- og 5 leder kabler[19]. . 17	17
Tabell 2-2 Gjennomsnittlig energiforbruk i Norge [20].	19
Tabell 3-1 Impdans verdier og fase vinkel for varierte kretselement kombinasjoner i AC-kretser.....	25
Tabell 4-1 Parameter for likeretter modell.....	35
Tabell 5-1 Oversikt til Figur 20 spenningsvariasjoner ± 30 % av nominell spenning.	45
Tabell 6-1 Kategori for rominndeling.....	51
Tabell 6-2 Oppsett for innhenting av koefisienter fra mat fil.....	52
Tabell 6-3 Oppsett kolonne vektorer (double).....	53
Tabell 6-4 Beskrivelse av innganger i Figur 6-4.....	54
Tabell 6-5 Tilleggsfunksjoner som kan benyttes for husholdningsapparater.....	66
Tabell 7-1 Utstyrliste på laboratoriet.	70

Forkortelser og notasjoner

THDi	Stømmens «total harmonic distortion»
THDv	Spennings «total harmonic distortion»
GUI	Graphical User Interface
Callback	Referert til Dialogvindu i Simulink modeller. Bruker gjør endringer, handling beregninger utføres i bakgrunn
ID	Identifikasjon
FFT	Fast fourier transform
IEC	International Electrotechnical Commission
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LED	Light Emitting Diode

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Det elektriske kraftnettet i Norge har eksistert i lang tid med relativt lite endringer, mens det tilkobles nytt utstyr hver eneste dag. Dette er spesielt med tanke på at bruken av kraftelektronikk-enheter øker raskt. Den elektroniske utviklingen har økt og dermed finner man enheter med strømrettere og elektronikk i nesten alt av utstyr, eksempelvis LED-lys, datamaskiner, kjøleskap og el-biler.

Med en hver ny enhet som tilkobles kraftnettet kan forholdet mellom effekt, strøm og spenning variere. I tillegg vil det også kunne oppstå støy og harmoniske strømmer i kraftnettet som kan forårsake problemer. Dette prosjektet skal forsøke å foreslå et rammeverk for modellering og simulering av husholdningsapparater i Simulink. I tillegg skal prosjektet kartlegge utstyrs karakteristikk/egenskaper. Hvordan prosjektet skal gå frem i denne prosessen er beskrevet i kapittel 1.5.

1.2 Avgrensninger

Avgrensninger i oppgaven er gitt punktvis. Den første avgrensningen omhandler simuleringstyper (via Simulink/Matlab) hvor det finnes flere ulike varianter av simulering etter ønsket formål. For dette emnet er det valgt å se bort ifra følgende for simuleringer:

- Ikke aktuelt med transiente simuleringer, siden dette ikke er med i problemstillingen.
- Simuleringer og modelleringer i sanntid blir for komplisert, og det velges derfor også å se bort fra dette.
- Detaljerte simuleringer er ikke aktuelt på grunn av den lange simuleringstiden. Med detaljerte simuleringer menes det å bygge opp hvert elektrisk utstyr, komponent for komponent i Simulink.
- Det vil ikke tas hensyn til ukjente eller tilfeldige laster i simulering (eksempel: stikkontakter med ukjent forbruk og ukjent tidsrom er ikke med).

Følgende lavspenning fordelingssystem er sett på:

- Netttilkobling i oppgaven skal omfatte kun IT og TN-nett, siden dette er mest brukt i Norge.

Spenningskvalitet og levering av elektrisk kraft fram til utstyr:

- Tar kun hensyn til nettet i normal drift, med små endringer i spenning og frekvens, og det vil ikke tas hensyn til feilsituasjoner og utfall av elektrisitetsforsyning.

I det norske hjem finnes det utallige elektriske utstyr som kan tilkobles det elektriske lavspenningsnettet. På grunn av dette velges det:

- Å kun se på et utvalg utstyr i hver kategori. Disse vil bli presentert i kapittel 3.

1.3 Problemformulering og hovedmål

For dette prosjektet er det ønsket å utarbeide et rammeverk for modellering og simulering av husholdningsapparater i Simulink. Med dette rammeverket skal det i simuleringen være mulig å sammenkoble flere enheter i de typiske husholdningene. I tillegg skal det være å mulig å gjøre dette i tilkoblet nettmodus og «øydriфт»-modus. Det skal tas med forskjellige typer modeller som skal vurderes for ulike tidsrom og oppløsninger.

Nedenfor ser man hovedmålene i prosjektet:

- Litteraturstudie av husholdningsapparater og deres egenskaper/karakteristikk
- Definere ulike typer simuleringer og detaljeringskrav for hver simulering
- Bygge et felles rammeverk for simulering av husholdningsapparater
- Bekrefte kun et utvalg av simulerte utstyr med eksperimenter

1.4 Forskningsspørsmål

Basert på motivasjonen i dette kapittelet, er det formulert følgende forskningsspørsmål:

Hvordan modellere og virtualisere husstander i Matlab/Simulink med standard utstyr i vanlige norske hjem med tanke på aktiv effekt, reaktive effekt og overharmoniske forstyrrelser?

I diplomoppgaven er det valgt å bygge modeller for å kunne få ut uttrykte THD, aktiv effekt og reaktiv effekt via strøm (alle utganger av modellene, er uttrykt via strøm og strømmens fasevinkel). Det er flere grunner til dette. En av dem er at man har blokker i Simulink som beregner denne effekten og THD via strømmen. Ved å gjøre dette vil man kunne få uttrykt aktiv effekt, reaktiv effekt og THD og samtidig en fleksibel oppbygning i modellen.

1.5 Oversikt over avhandlingen

Denne diplomoppgaven er delt inn i åtte kapitler, og hvert av kapitlene tar for seg ulike aspekter ved emnet som undersøkes.

Kapittel 1 omhandler bakgrunn til oppgaven og dens avgrensninger. Forskningsspørsmål og problemformulering for oppgaven er beskrevet i 1.3 og 1.4, mens i 1.1 og 1.2 er bakgrunn og avgrensninger presentert.

Kapittel 2 beskriver litteraturstudiet av tidligere forskning og definerer ulike metoder for modellering av husholdningsapparater. Definisjoner på matematiske og elektrotekniske uttrykk som blir benyttet gjennom oppgaven er også forklart her.

Kapittel 3 presenterer kategorisering av ulike belastningstyper og deres karakteristikker.

Kapittel 4 tar kategorisering fra kap.3 til hensyn og beskriver analysen av lasttypene og krav til simuleringer basert på utviklede modeller i Simulink.

Kapittel 5 introduserer spenningsvariasjoner og verifiserer en metode for å kompensere for endring i spenning i modellen.

Kapittel 6 bygger videre på kap.3, 4, 5 og etablerer et felles rammeverk for husholdningsapparater. Videre beskrives også simuleringers hensikt, de ulike oppløsninger og løsninger på simulering for disse på ulike utstyrene.

Kapittel 7 gjennomfører flere verifikasjoner med eksperimenter for rammeverket til husholdningsapparatene.

Kapittel 8 konkluderer avhandlingen og gir anbefalinger til videre forskning.

2 Teori og litteraturstudie

2.1 Tidligere forskning

Igjennom diplomoppgaven har man satt seg inn i forskningen på fagområdet. Databasene som er mest benyttet er publikasjoner ved IEEE, men har også funnet relevante masteroppgaver og lærebøker på Universitetsbibliotek. I tillegg til at det er utført en litteraturstudie av artikler og masteroppgaver, er også litteraturstudien av husholdningsapparater og deres karakteristikk presentert i kapittel 3. Mange av funnene i artiklene fokuserer på undersøkelser basert på statistiske data og målte data. Artiklene gir ingen direkte veiledning, men inneholder relevante figurer og noen tabeller som kan brukes til kontroll og verifikasjon av utførte simuleringer på modellen i Simulink.

2.1.1 Beskrivelse av relevante artikler

I diplomoppgaven har man satt seg inn i forskningen på fagområdet, samt at flere artikler innenfor modellering og simuleringer er beskrevet og vurderet for deres relevans i dette kapitlet. I [1] viser en innledning knyttet til karakteristikken av gode lastmodeller, der ZIP-modellens egenskaper er videreutviklet i kapittel 5.2. Beskrivelse om utladende belysning og karakteristikken til dem som en funksjon av spenningen er hentet ut og beskrevet i kapittel 5.1. Fra [2] er det hentet ut for hvilke perioder det er aktuelt å definere simulering og for hvilke sykluser det er aktuelt å ha med for ulike apparater (se kapittel 6.5). Neste var metoden i [3] en sammenligning av målte AC-kurveformer og estimerte AC-kurveformer. Dette er dratt videre når min modell skal sammenligne simuleringer mot målinger på laboratoriet. Dette er uthentet og beskrevet i kapittel 7.3, hvor min algoritme parameterestimering valideres mot ulike målte kurveformer.

I [4] er det utviklet en språkmodelleringsmetode for klassifisering av tidsserier som viser apparatens energiforbruk. Denne er basert på 27 ulike husholdningers energiavlesninger gjennom ett år tidsperspektiv. I neste relevante artikkel er det gjennomført [5] modelleringer på husholdninger i en større skala basert statistikk. Deretter [6] skrives det om smarthus-modellering basert temperaturer lokalt nært utstyret med utganger på modellene med energi profiler i aktiv effekt. I min diplomoppgave er modelleringer av utstyr med flere sekvenser, som oppvaskmaskinmodell videreutviklet i kapittel 6.6. Ellers med tanke på at modellene kun baseres på aktiv effekt er ikke mye videreført fra [6].

Videre er [7] en storkastisk model utviklet for modellering av harmoniske laster i husholdninger, også vises simuleringer av når på døgnet strømkomponenten harmoniske forvregninger oppstår, basert på statiske modeller. I [8] er det gjennomført målinger og simuleringer av husholdningsapparater for harmoniskeanalyser. Der hvor målinger og simuleringer av utstyr er diskutert, med resultater av LCD TV, vanlig kjøleskap og en oppvaskmaskin. Denne artikkelen har hovedfokus på THD_i og THD_v av tre ulike typer

utstyr. Modelleringsmetoden for min del er for tidskrevende når flere utstyr skal settes sammen til et felles rammeverk. Avslutningsvis er [9] og [10] en lastplanleggingsalgoritme bygget for høy og normal strømforbruk hos husholdningsapparater i boligområde.

2.1.2 Gjennomgang av utvalgte relevante artikler

2.1.2.1 Standard load models for power flow and dynamic performance simulation

I [1] beskrives anbefalte standard lastmodelleringer for effektflyt ved dynamiske simuleringer. En av de interessante delkapittelene i innledningen er knyttet til karakteristikken av gode lastmodeller, der ZIP-modellen (konstant impedans/strøm/effekt) er en slags beskrivelse av egenskapene basert på om lasten inneholder konstant impedans/strøm eller effekt. Denne har jeg videre utviklet i kapittel 5.2. Beskrivelse og evaluering av utladende belysning og karakteristikken til disse som en funksjon av spenningen er hentet ut og beskrevet i kapittel 5.1. Ellers er denne artikkelen noe urelevant grunnet mye dynamiske simuleringer som formål, og dette er avgrenset i problemstillingen min.

2.1.2.2 «Appliance Scheduling Optimization in Smart Home networks»

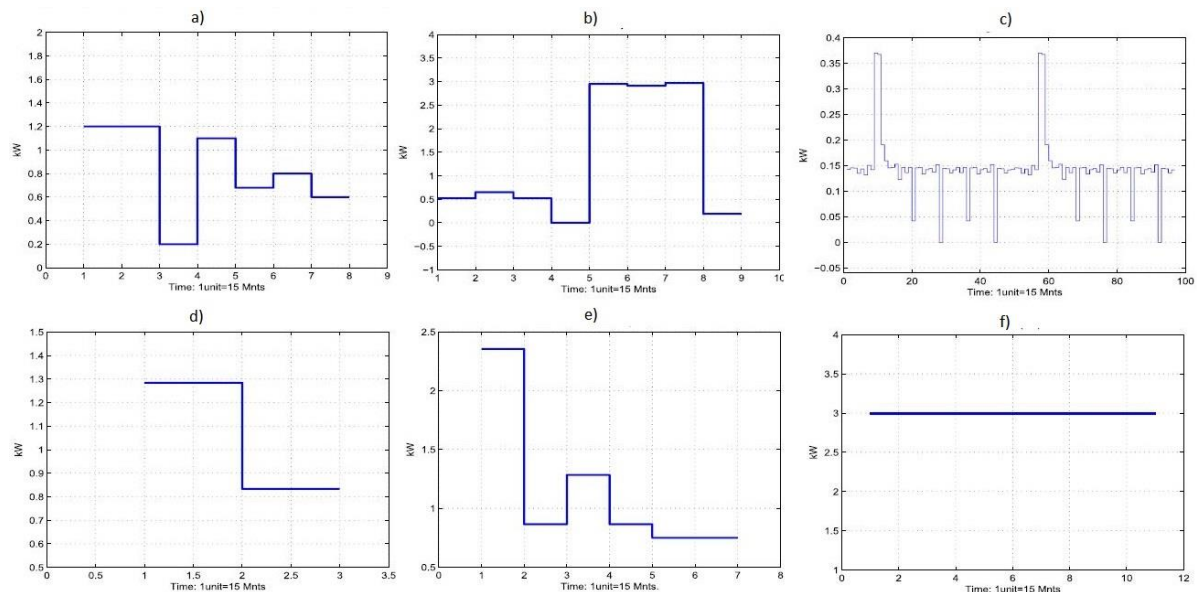
I [2] er en oversikt over ulike lasttyper knyttet til home area network (HAN) for «appliance scheduling optimization». Disse tar utgangspunkt i utstyrets aktive effekt, og tar ikke hensyn til reaktiv og overharmoniske forstyrrelser. For HAN-strukturen er laster delt inn i underkategorier som styrbare og ustyrbare laster for å forklare systemmodellen. Kategoriseringen av de styrbare lastene er delt inn i tre kategorier:

- Endrende last (Shiftable load): Fleksibel forsinkelse med viss forbruk syklus med spesifisert energiforbruk. Eksempelvis vaskemaskin, oppvaskmaskin eller lignende.
- Avbrytbar last (Interruptible load). De er enten på med konstant last eller av. Når den er på, avhenger dette av innstillingen av brukerinnstillingen.
- Værbasert belastning. Eksempelvis varmpumper og elektriske varmeelementer som er avhengig av utetemperatur.

Når det nevnes ustyrbare laster er det ment tv, bærbare datamaskiner og lys. Men når det kommer til tv, lys, klokker, telefoner, datamaskiner og sammenlignes de med styrbare laster, er last forbruket så lite og anses som ubetydelig. I tillegg har appartene lite forutsigbarhet.

Videre i artikkelen er det beskrevet lastprofiler på ulike utstyr i en husholdning (Figur 2-1), med målte lastkurver. Disse lastprofilene er innenfor ulike simuleringstider over relativt korte perioder. I Figur 2-1 er en rute(unit) 15 minutter, men de er basert på tider hvor det elektiske utstyret har forbruk av elektrisk energi. Figur 2-1 d) viser oven om

morgenen, mens e) viser ovn om kvelden når to ovener ofte er i bruk, ovnen er på i 1.5 time når lasten varier mellom 2.35kW og 0.75kW.

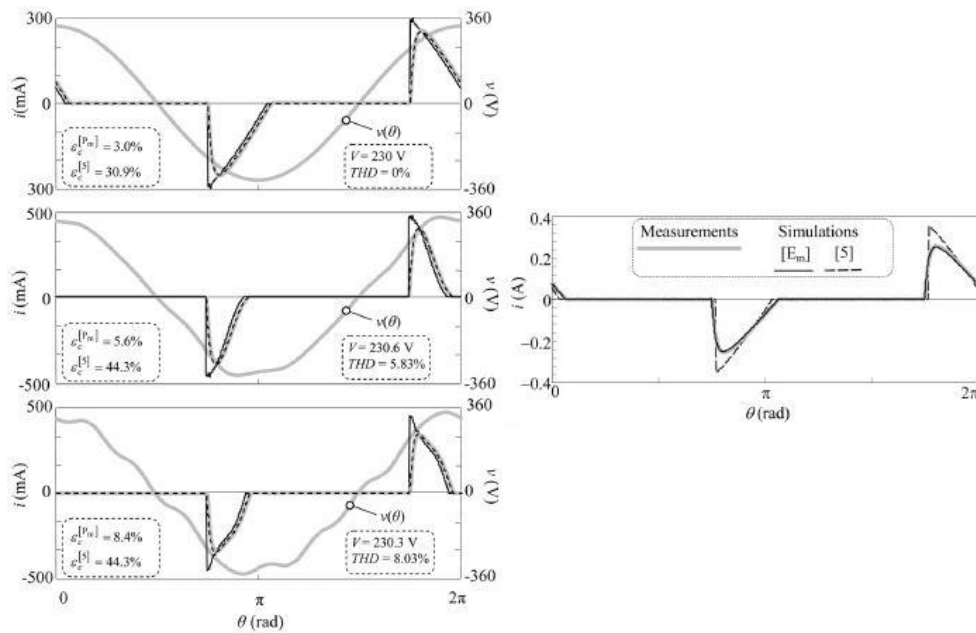


Figur 2-1 Last profiler i kW; a) oppvaskmaskin b) vaskmaskin & tørketrommel c) kjøleskap d) ovn om morgenen e) ovn om kvelden f) elektrisk bil, [11] [9].

Fra denne tidsartikkelen er det ingen direkte overførbar informasjon som kan benyttes i diplomoppgaven, men det som er interessant er hvordan kategorisering av laster i husholdningen blir gjennomført. Man ser også ut ifra Figur 2-1 hvordan lastprofilen til de ulike lastene varierer i aktiv effekt over de gitte tidsrommene de er målt. Fra er dette er det hentet ut for hvilke perioder det er aktuelt å definere simulering, og for hvilke sykluser det er aktuelt å ha med for ulike utstyr. Dette er videre presentert i kapittel 6.

2.1.2.3 “Model of Electronic Ballast Compact Fluorecent Lamps”

I [3] er det utviklet en modell av kompakt fluoriserende lamper med ballast. Denne er utviklet for å evaluere strømkkvalitet på grunn av ikke-lineariteten i strømkkurvene, og for å kunne forutsi harmoniske forvrenginger til det elektrisk nettet der den er tilkoblet. Det er laget en enkel estimeringsalgoritme for å bestemme modellparameterne fra eksperimenter og målinger.



Figur 2-2 Validering av parameterestimering av 14-W Philips CFL modell, der AC-kurveformer av målte og estimerte strømkurve sammenlignes[3].

Med tanke på problemstillingen min er denne tidsskriftartikkelen aktuell. Metoden ved å sammenligne AC-kurveformer av målte og estimerte strømkurve, er dratt videre når min modell skal sammenlignes mot fysiske målinger på laboratoriet. Dette er uthentet og beskrevet i kapittel 7.3, hvor min algoritme parameterestimering valideres mot ulike målte kurveformer. Figur 2-2 fra [3] viser hvordan en slik sammenligning kan se ut etter utført modellering og validering av parameterestimering av en 14-W Philips CFP-modell. En annen fordel er å se på hvordan parameterne er fremstilt matematisk når en modell skal bygges og simuleres, noe som er beskrevet i artikkelen.

2.1.2.4 «Profiling household appliance electricity usage with N-gram language modeling»

I [4] skrevet av fire forfatterene; Daoyuan Li, Tegawend'e F. Bissyand'e, Sylvain Kubler, Jacques Klein and Yves Le Traon, er husholdningsapparatenes klassifikasjoner basert på det elektriske bruksmønsteret beskrevet.

Det er utviklet en språkmodelleringsmetode for klassifisering av tidsserier som viser apparatenes energiforbruk. Metoden er basert på 27 forskjellige husholdningers energiavlesninger gjennom ett år. Fra denne oppgaven er undersøkelsen fra HEUS-prosjektet interessant for å kunne sammenligne simuleringer. Dette kommer frem i figur 3 i papar'et og viser kurvene til de ulike lastene med hensyn på aktiv effekt. Forfatterne har gjennomført en simulering av den aktive effekten over 200 minutter og viser bruksmønsteret til de ulike lastene. I tillegg er det utarbeidet en tabell i teksten, som presenterer det mest brukte apparatets kombinasjoner og klassifikasjonsresultater.

2.1.2.5 Modeling of household electricity load profiles for distribution grid planning and operation

I [5] er det gjennomført modelleringer på husholdninger i en større skala. "Markov chain"-modellen har blitt benyttet for å generere husholdningen energi i en tidsserie med formålet å planlegge og vurdere distribueringen av energi. Ut ifra de statiske dataene, karakteristisk oppførsel til utstyret og med sammenkobling til tidsserien er det utført simuleringer på 15 minutters skala.

2.1.3 Gjennomgang av relevante masteroppgaver

Det er utarbeidet en tidligere diplomoppgave, "Load characteristics and power quality in the future Norwegian households" av forfatter Lars Stensvold[12]. Denne oppgaven fokuserer på kartlegging av hvilke utstyr som eksisterer i norske husstander og raskt hvilke egenskaper utstyret har, noe som nevnes mer i kapittel 5. Samtidig undersøkes eksperimentverifikasjon, og det er gjennomført flere målinger av ulike typer utstyr via oscilloskop som viser kurveformene. Dette gir en identifikasjon av hvordan hvert apparat oppfører seg inn mot nettet og dette skal også være mulig å kontrollere under modellering. Oppgaven baserer seg på en detaljert modelleringsmetode av hvert enkelt utstyr og er uønsket med tanke på min problemstilling når det ønskes et felles rammeverk. Med detaljert modellering menes det å bygge opp hvert elektrisk apparat, komponent for komponent i Simulink. Hver enkelt transistor eller diode må altså spesifiseres på modellen i hvert enkelt utstyr.

I [13] er det utført målinger på forbrukerutstyr i et bygg, sett på påvirkningene og utarbeidet forslag til tiltak på overharmoniske strømmer i elektriske installasjoner. Deretter i [14] tas det også hensyn til elektroniske utstyrs kilder som har ulinearitet i elektroinstallasjoner. Oppgaven undersøker konsekvenser ved overharmoniske strømmer og tiltak for utbedring når disse oppstår. Teorianalysen ifra masteroppgaven er videreført blant annet for enfase likeretter (i kapittel 3.1) og LED (i kapittel 3.3). For i [13] og [14] er det utført målinger på næringsbygg, kontor- og undervisningsbygg, men ingen modellering og simulering av husholdningsapparater.

2.2 Modelleringsmetoder

Simulink er et blokkdiagrambasert program for simulering av stasjonære og dynamiske systemer som bygger på Matlab. Det finnes eksisterende biblioteket for matematiske modeller av ulike komponenter. Dette kapittelet skal gi en oversikt over ulike modelleringsmetoder som er vurdert, samt forklare kort hva de ulike metodene innebærer.

2.2.1 Detaljmodellering for hvert enkelt utstyr

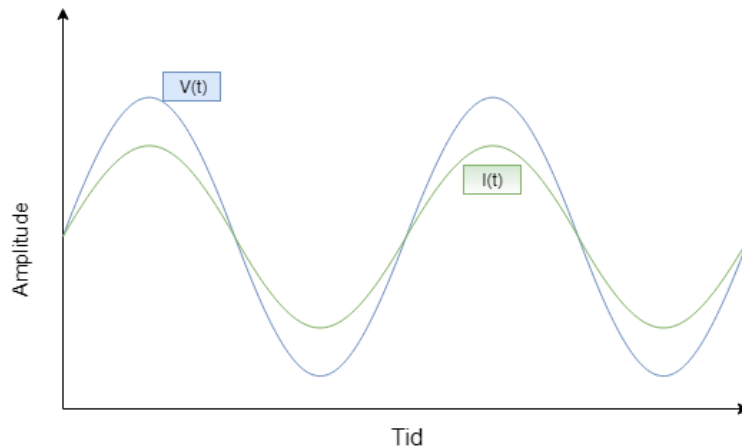
For elektriske systemer eksisterer det et bibliotek i Simulink, blant annet «Simscape», som har enkeltkomponenter ment for elektronikk og kraftelektronikk, men ingen direkte for husholdningsutstyr. Enkeltkomponenter kan settes sammen til en komplett modell for et husholdningsapparat. Mange av disse enkeltkomponentene er generelle og må spesifiseres detaljert for å få en fysisk tilnærming til husholdningsapparater. Ved denne metoden må man modellere hvert enkelt utstyr for å få en korrekt oppbygning av apparatet. Det betyr at hvis man eksempelvis skal modellere en elbillader, må man finne en spesifikk elbillader, og modellere alle elektriske komponenter den inneholder. Herunder må man modellere alle komponentene ned til den enkelte transistor og diode. En ulempe ved denne metoden er at det blir veldig lang simuleringstid, da alle modellene i en husholdning blir for komplekst

Metoden er til dels gjennomført i [12], hvor det er modellert etter hvilke elektriske komponenter som eksisterer i hvert utstyr. Dette forekommer i tidligere masteroppgaver, men er noe som sees som utenfor denne oppgavens område, som spesifisert i min avgrensing, og dermed utgår denne metoden.

2.2.2 Lineære modeller

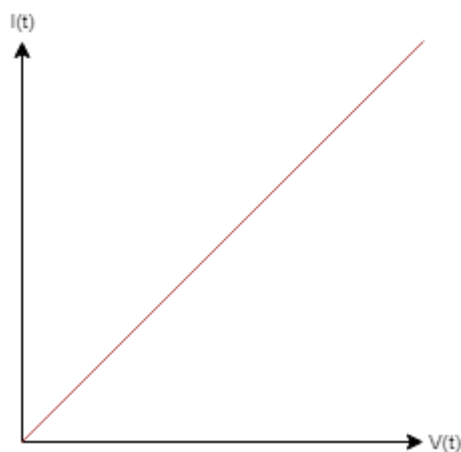
2.2.2.1 Introduksjon om lineære laster

En lineær last kan defineres ved at lastkilden forbruker strøm som er proporsjonal til spenningskilden i kraftnettet. En strøm- og spenningskurve for lineære laster kan ses i Figur 2-3.



Figur 2-3 Spenning- og strømkurve for lineære last.

En lineær elektrisk krets er gitt ved en sammensetning av komponenter som er konstant(ideell). Forholdet mellom spenning og strøm er direkte proporsjonalt som vist i Figur 2-4.



Figur 2-4 Lineær krets spenning- og strøm forhold.

Å modellere husholdningsapparater ved bruk av denne metoden vil gi lite mulighet for ulineære kurveformer, hvor en stor del av apparatene, eksempelvis likeretterlaster, er ulineær. Noen metoder av lineære modeller er benyttet for impedansbelastninger i modellene for simuleringer. Dette presenteres nærmere i kapittel 6.4.

2.2.2.2 State-space modell

I state-space formen er forholdet mellom inngang, støy(noise) og utgangssignal skrevet som et system av første-ordens differensial eller forskjellige likninger med uttrykk via $x(t)$. Nedenfor er et generelt uttrykk for state-space, der det omgjøres til en transfer funksjon[15]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

Hovedkonseptet er dette, der transferfunksjonen er gitt ved:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C\phi(s)B + D = C(sI - A)^{-1}B + D\tag{2.2}$$

Og den karakteristiske likningen av transferfunksjonen er:

$$|sI - A|\tag{2.3}$$

Dette er en enkel måte å representere laster på matematisk, som også er anvendbart i Matlab/Simulink.

2.2.2.3 Transfer funksjoner modell

For lineære modeller er det mulig å representere elektriske systemer via en transferfunksjon. Transferfunksjoner kan representere tilstandsmodeller av ulike nivåer; SISO (Singel input, singel output), MISO (Multiple input, singel output) og MIMO (Multiple input, multiple output) som kan nevnes som dynamiske systemer. Nedenfor illustreres et generelt uttrykk for n^{th} ordens transferfunksjon i formel (2.4):

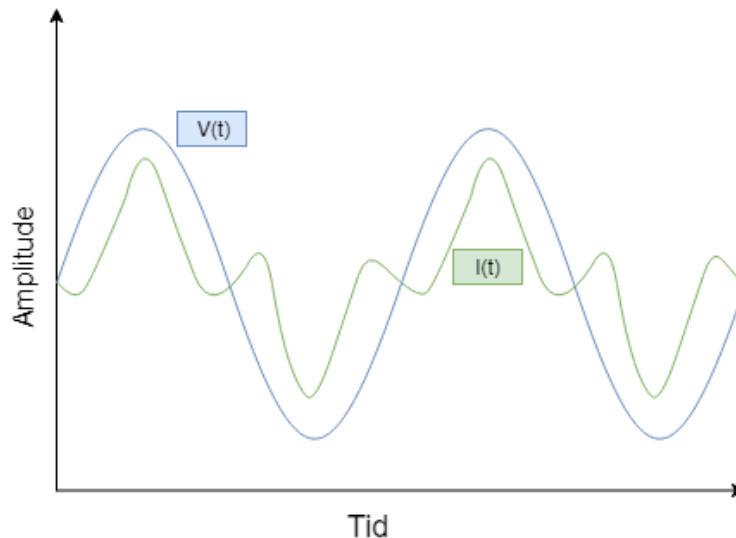
$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0s^n + b_1s^{n-1} + \dots + b_{n-1}s + b_n}{s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n}\tag{2.4}$$

I Simulink ligger disse blokkene allerede klare for innsetting i henhold til kravene som Simulink krever. Disse blokkene kalles «Transfer Fcn» og finnes for både diskrete tidssignaler og kontinuerlige tidssignaler. Blokkene kan settes opp med første og andre ordensoppsett, herunder eksempelvis «lead or lag», «real zero».

2.2.3 Ulineære modeller

2.2.3.1 Introduksjon om ulineære laster

Om man skal sammenligne en lineær last med en ulineære last, er hovedforskjellen at strømmen fraviker (mye) fra en sinusform. Karakteristikken til strømkurven får et brattere stigningstall og skarpere krumming som vist på Figur 2-5. Et resultat av at strømkurver blir forvrengte, som videre presenteres i 2.4, er overharmoniske forvrenginger av strømmen (THDi).



Figur 2-5 Spenning- og strømkurve for ulineære last.

2.2.3.2 Matematisk modellering av ulineære modeller

Mens en lineær likning har grunnleggende form, kan en ulineære likning ha mange forskjellige former. En enkel måte å bekrefte at den er ulineær, er å sjekke om den oppfyller kriteriene i kapittel 2.2.2. Hvis dette ikke tilfredsstilles, er den ulineær. Parameterne kan ha formen av eksponentiell, trigonometrisk, kraft eller en annen ulineær funksjon. For å bestemme de ulineære parameterestimatene, brukes vanligvis en iterativ algoritme. Nedenfor er et uttrykk for en ulineær funksjon i formel (2.5):

$$y = f(x, \beta) + \varepsilon \quad (2.5)$$

Hvor, β er representerer ulineære parameterestimer som skal beregnes, og ε representerer feilbetingelsene. Vanlige algoritmer for bruk av ulineære modeller er listet opp nedenfor:

- "Gauss-Newton"-algoritmen
- "Gradient descent"-algoritmen
- "Levenberg-Marquardt"-algoritmen

2.2.4 Dekomponeringer av forvrengte kurveformer ved fourier rekke

De fleste forvrengte periodiske kurveformer kan bli dekomponert til en fourier-rekke som består av et fastledd, en sinuskurve med grunnharmonisk frekvens og et antall sinuskurver med frekvens av harmonisk størrelse [16]. Fourier-rekken består også av et cosinus-ledd, om man tar med både par- og odde overharmoniske. I formel (2.6) ser man et uttrykk for strømmen, $i(t)$, i form av en Fourier-rekke.

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sin(h\omega_1 t + \theta_m) \quad (2.6)$$

, der I_{dc} er likestrømsleddet, I_m er toppamplituden til hver orden m , ω_1 er en grunnharmonisk frekvens i rad per sekund, og θ_h er overharmonisk fasevinkel.

Hvis man omformer likning (2.6) til cosinus form:

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos(h\omega_1 t + \theta_m - 90^\circ) \quad (2.7)$$

Med en slik rekke vil periodetiden for bølgeformen være:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi}{2\pi f_1} = \frac{1}{f_1} \quad (2.8)$$

Om funksjonen $i(t)$ er periodisk med en identifiserbar periode T , så kan $i(t)$ bli skrevet på rektangulær form:

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{m=1}^{\infty} [a_k \cos(h\omega_1 t) + b_k \sin(h\omega_1 t)], \omega_1 = \frac{2\pi}{T},$$

hvor

$$I_{avg} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt, \quad (2.9)$$
$$a_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \cos(k\omega_1 t) dt,$$
$$b_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \sin(k\omega_1 t) dt.$$

Formel (2.9) er benyttet i modellene for å rekonstruere signalene i kapittel 6.3, når koeffisientene er framskaffet av fast fourier-transformen, noe som vil bli beskrevet i neste kapittel.

2.2.4.1 Fast fourier transform

Fast fourier transform er en metode som er benyttet i diplomoppgaven for å bestemme koeffisientene til Fourier-rekken. Den har som egenskap, som navnet tilsier, å være en rask algoritme som beregner den diskrete fourier-transformasjonen (dft) av en sekvens. Den diskrete fourier-transformasjonen er egentlig bare et hjelpemiddel, eller et verktøy,

for å konvertere bestemte typer sekvenser av funksjoner til andre typer presentasjoner [17].

En generell matematisk formel av dft er vist i formel (2.10), der dft har en sekvens $X(n)$ av antall N komplekse verdier gitt av $x(n)$ av lengden N , i henhold til formelen:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.10)$$

hvor: $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$

Rask fourier-transformasjon er mye anvendt i ulike typer signalbehandling, hvor det å lese frekvensaktivitet, lydbølger eller bildebehandling teknologi er nyttig. Det er en relativt matematisk del av både databehandling og elektroteknikk, der fft og dft benyttes av ingeniører og matematikere med formål om å utvikle ulike teknologi. Fft er benyttet i blant annet spenningsmåling og i seismologi. En annen fordel med fft/dft er at den kan brukes som en kombinasjon med andre metoder, der fft finner frekvenskomponenten. Denne metoden for å rekonstruere kurveform til strømmen er videre verifisert og sammenlignet med simuleringer. Dette vil utdypes i kapitel 4.

2.3 Lavspente fordelingsystemer

Formålet til det lavspente fordelingsystemet er å distribuere og fordele elektrisk kraft fram til forbrukeren av elektrisk energi. Den elektriske energien fordeles fra en transformator og helt fram til det elektriske apparatet i installasjonen. Det lavspente fordelingsystemet deles hovedsakelig inn i tre typer og karakteriseres ved spenning, system- og beskyttelsesjording og lederantall [18]. I henhold til IEC og CENELEC, brukes disse typene i Norge:

- IT-nett
- TT-nett
- TN-nett (TN-C-nett, TN-S-nett og en kominasjon av dem, TN-C-S-nett)

I denne Diplomoppgaven, utelates TT-nett, grunnet lite relevans for husholdninger og anses som et utadgående fordelingsystem for framtiden. Nedenfor er et sitat fra Eilif Hugo Hansens sin bok om elektroinstallasjoner, hvor det gis forklaring av systemoppbygning [18], på side 11:

«Første bokstav, som forteller om nettsystemets forhold til jord:

T = Direkte forbindelse fra et punkt i strømsystemet til jord. Vanligvis er dette fra nøytralpunktet i transformatorens sekundærutvikling.

I = Alle spenningsførende deler er isolert fra jord. Nøytralpunktet (eller en av ytterlederne) kan være koblet til jord via et gjennomslagsvern.

Andre bokstav, forteller om jordingsforholdet for utsatte anleggsdeler:

*T = Direkte fra utsatte anleggsdeler til jord, uavhengig av jording andre steder i systemet.
N= Utsatte anleggsdeler har direkte forbindelse tilbake til systemets jordingspunkt via beskyttelsesleder.*

Med utsatte deler mener vi en ledende del som lett kan berøres, og som normalt ikke er spenningsførende, men som kan bli spenningsførende på grunn av isolasjonsfeil.

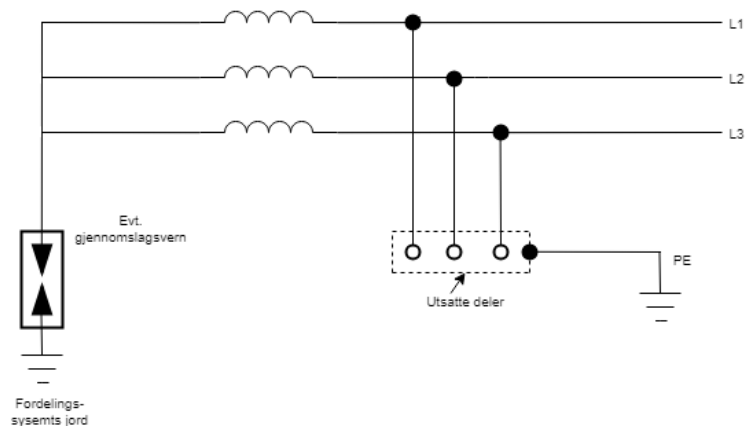
Påfølgende bokstaver beskriver bruken av nøytralleder (N-leder), beskyttelsesjordleder (PE-leder) eller kombinert PEN-leder i TN-nett.

S = nøytrallederen (N-lederen) og beskyttelsesjordlederen (PE-lederen) er ført ut som separate ledere.

C= nøytrallederen (N- lederen) og beskyttelsesjordlederen (PE-lederen) er ført ut som en kombinert leder (PEN-leder)».

2.3.1 IT-nett

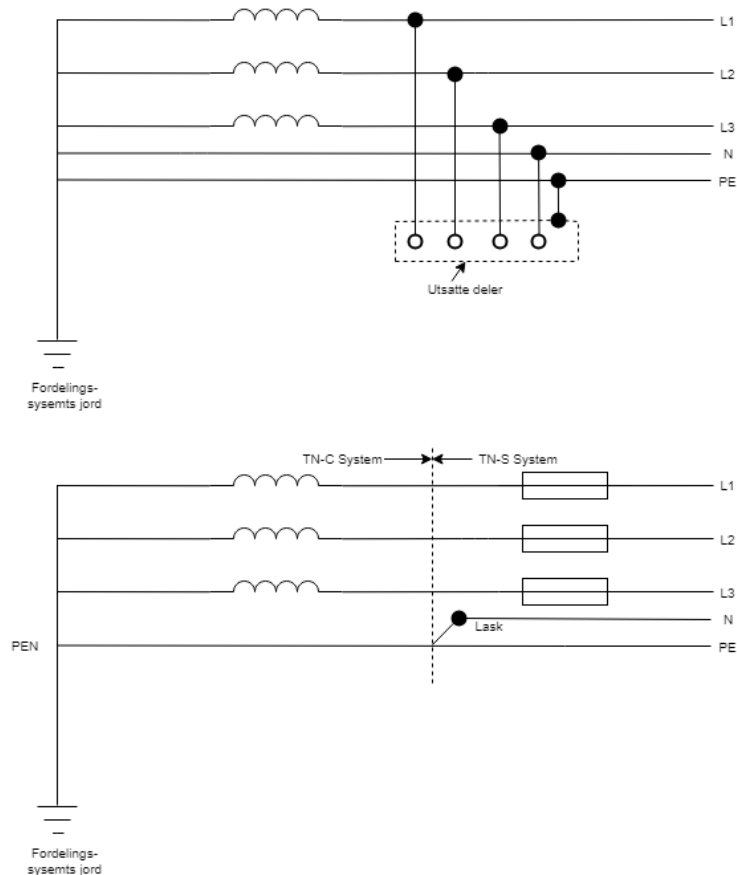
Strukturen i et IT-system er at de har alle spenningsførende deler isolert fra jord. Det kan også ha et punkt jordet over en høy impedans, eller beskrevet som et eventuelt gjennomslagsvern i Figur 2-6. Linjespenningen for denne type nett er 230V, som vil si at det er 230V mellom fase L1 og L2, samt mellom L2 og L3. IT-nett har stor utbredelse i Norge, og er kanskje den typen av fordelingssystemer som er mest benyttet når strømmettet ble utbygget rundt 1940-tallet.



Figur 2-6 IT-nett.

2.3.2 TN-nett

I et 230/400V system er det 400V linjespenning, med andre ord 400 V mellom fase L1 og L2, noe Figur 2-7 viser. For å få ut 230V til forbrukerutstyret kobles det mellom fase L1, L2 eller L3 og N en leder, som vist på Figur 2-7.



Figur 2-7 TN-nett.

I [19] skrives det at TN-nett har et punkt direkte jordet ved strømkilden, og med utsatte ledende deler forbundet til dette punktet gjennom beskyttelsesledere. I bygninger, for eksempel en stor bolig, kan TN-C-nett kun benyttes for forsyning fram til hovedfordeling. Etter denne hovedfordelingen skal nøytral- og beskyttelsesleder være adskilt. I husholdninger kan strømmen i en slik nøytral-leder bli av større orden, noe som vil bli nærmere forklart i delkapittel 2.3.4.

2.3.3 Bruken av TN-og IT nett i husholdningers modell

For rammeverket er det lagt opp et krav om at de skal kunne tilkobles i TN-og IT nett for simuleringer. Disse kan senere analyseres slik brukeren selv måtte ønske. Ved å legge opp til at modeller av utstyr skal kunne kobles sammen som både TN- og IT-nett, vil problemer med overharmoniske forvrengninger i spenning og strøm fra moderne utstyr kunne identifiseres.

2.3.4 TN-nett strøm i N-leder for husholdninger

Strømmen igjennom N-leder i et TN-nett er summen av fasestrømmene i faselederne. På grunn av dette har den høyere amplitude enn de andre fasestrømmene. Med flere apparater som skaper forvrengte kurveformer, for eksempel likerettere, vil dette ytterligere skape mer harmoniske strømmer i N-leder. For å kompensere for de forvrengte strømmene, har NEK:400 [19] opprettet en anbefaling når prosjektering av elektroinstallasjonen inntreffer, som betyr at det legges inn korreksjonsfaktor for disse strømmene og kompenserer for THD i N-leder, se Tabell 2-1.

Tabell 2-1 Reduksjonsfaktor og overharmoniske strømmer i 4- og 5 leder kabler[19].

3. harmoniske innhold i fasestrømmen (%)	Reduksjonsfaktor	
	Ledertversnitt valgt på basis av fasestrøm	Ledertversnitt valg på basis av nøytralleder
0-15	1	-
15-33	0,86	-
33-45	-	1
>45	-	0,86

Derfor tar [19] høyde for dette ved tilfeller av høy THD, der faselederne må korrigeres ved hjelp av nøytrallederen, uavhengig av om fasestrømmene er lave. Siden TN-nett har tilkoblet nøytralleder til jord via PEN-leder, vil de overharmoniske strømmene forflytte seg hos faselederne.

2.4 Total Harmonisk Forvrengning (THD)

Total harmonisk forvrengning, THD (eng: Total Harmonic Distortion), er en måte å fremstille graden av harmonisk forvrengning på i spenning og strøm. Det er vanlig å representere THD med hensyn til rms-verdien til spenningen og strømmen eller til hensyn av den grunnharmoniske komponenten. Formel (2.11) og (2.12) viser uttrykket for THD for strøm og spenning:

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{m=2}^{\infty} I_m^2}}{\frac{I_1}{\sqrt{2}}} \quad (2.11)$$

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{m=2}^{\infty} U_m^2}}{\frac{U_1}{\sqrt{2}}} \quad (2.12)$$

2.5 Aktiv og reaktiv effekt

Det elektriske kraftsystemet inn til en bolig er hovedsakelig ført via kraftledninger og gjennom transformatorer. Kraftsystemet er ofte basert på vekselstrøm med form som et sinussignal, på grunn av dette skifter også retningen på strømmen kontinuerlig. For husstander som er forsynt med vekselstrøm fra nettleverandør oppstår det aktiv- og reaktiv effekt gjennom at det er tilkoblet forbukerutstyr i husstanden. Vektorsummen av aktiv- og reaktiv effekt er lik tilsynelatende effekt. Den aktive effekt, [P] er en reel del av komponenten. Denne er videre kommentert i kapittel 3.2. Den aktive effekten utgjør et arbeide i en elektrisk sammenkoblet krets og måles gjennom for eksempel energimåleren i husstanden i [kW], der man som oftest måler over timer i [kWh]. Formler til kalkuleringer av aktive effekter sees her:

$$P = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi \quad (2.13)$$

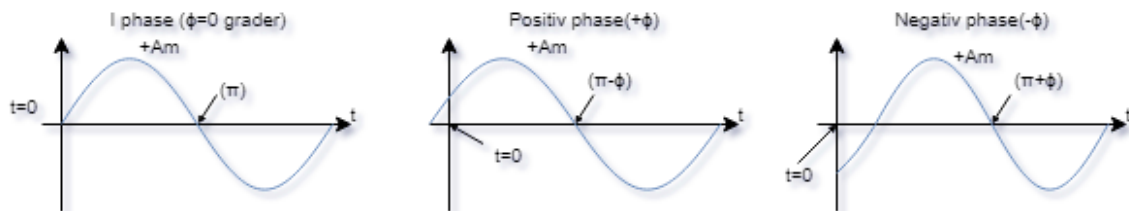
, der faseforskyvningen mellom spenning og strøm er:

$$\varphi = \varphi_v - \varphi_i \quad (2.14)$$

Reaktiv effekt dannes av kapasitansen og induktansen i vekselstrømkretsen, slik utstyr som typisk inneholder kondensatorer og spoler. I slike typiske kretser, oppstår det faseforskyvningen. Den reaktive effekten kan uttrykkes slik:

$$Q = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \sin \varphi \quad (2.15)$$

Figur 2-8 illustrerer faseforskyvningen som oppstår. Helt til venstre er kurven i fase med amplituden A_m og kurven krysser fra positiv til negativ ved π .



Figur 2-8 Sinusbølgeform med positiv- og negativ faseforskyvning.

2.6 Energiforbruk i Norge

I Norge er det et stort utvalg elektriske komponenter som kan tilkobles det elektriske systemet i boligen. Dette kan variere fra småelektriske ladere, til større laster som vaskemaskin eller komfyr. Man kan dele inn boligen etter romfordeling for å få en oversikt over hva enheten inneholder. Det er ofte hvitevarer på kjøkken som trekker mere effekt fra nettet, men har relativ lav brukstid, unntatt kjøleskap og fryseboks, som kan ha noe høyere enn de andre apparatene[20]. Den største delen av energiforbruket i norske boliger baserer seg på oppvarming.

I [20] og Tabell 2-2 er det satt opp en oversikt av gjennomsnittlig energiforbruk og brukstid i timer per dag for en bolig på 120m². Denne viser hvor utstyret befinner seg, og tabellen viser forbruk i kjøkken, bad og stue, samt hele boligens totale forbruk.

Tabell 2-2 Gjennomsnittlig energiforbruk i Norge [20].

Sted:	El. utstyr	Effekt(Watt)	Brukstid (Timer/ uke)	Forbruk(kwh/år)	Kr/år
Kjøkken	Komfyr	2200	7	800	400,-
	Kjøkkenvifte	75	2	10	5,-
	Kaffetrakter	1500	3,5	270	140,-
	Oppvaskmaskin	2000	7	730	360,-
	Kjøleskap	160	56	470	230,-
	Fryseboks	175	70	640	320,-
	Brødrister	1000	0,2	10	5,-
Bad	Vaskemaskin	2500	4	520	260,-
	Tørketrommel	3000	3	470	230,-
	Hårføner	750	1	40	20,-
	Barbermaskin	10	0,5	0	0,-
Stue	Tv	100	21	110	50,-
	Stereoanlegg	25	28	40	20,-
	Støvsuger	1000	1	50	25,-

<i>Hele boligen</i>	Oppvarming	3300	84	14.400	7.700,-
	Vannoppvarming	1000	70	3.600	1.800,-
	Belysning	1080	49	2.800	1.400,-
<i>Totalt forbruk</i>				25.000	12.500,-

I Tabell 2-2 er strømprisen 50 øre per kilowatttime (kWh). Tabellen gir en identifikasjon av hvilket utstyr som er mest brukt; dette med hensyn til aktiv effekt og et økonomisk innblikk.

3 Kategorisering av belastningstyper og beskrivelse av deres karakteristikk

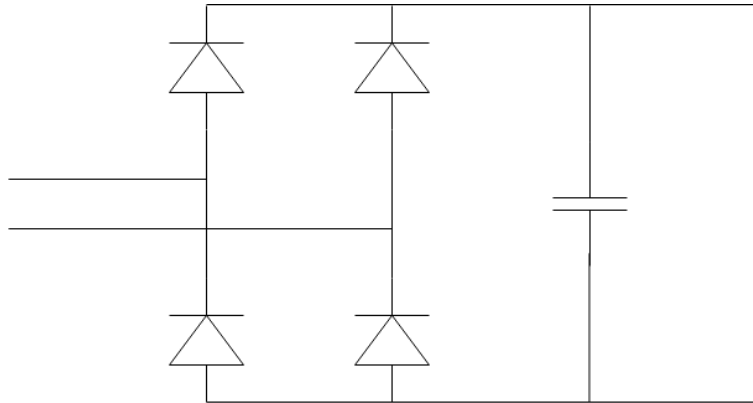
I norske hjem tilkobles det en rekke type utstyr i det elektriske kraftsystemet som forbruker elektrisk energi." Det kan bety at det finnes millioner av ulike typer elektronikk som kan tilkobles stikkontakten, eller via andre strømkilder hver eneste dag". På grunn av dette er det gjennomført en sortering av standard utstyr i normale norske hjem i denne oppgaven. Denne sorteringen er basert på hvilken type elektrisk komponenter de ulike lastene inngår, sett ifra vekselstrømsiden av utstyret i lavspenningsinstallasjonen. I punktlisten nedenfor er de ulike belastningstypene:

- Likeretter med diodebru
- Impedans
- Resistiv (inngår i impedans)
- Faseinnsnitt- og faseavsnitt dimming
- Universalmotor
- Ulineære laster

Disse belastningstypene er beskrevet i de neste kapitlene som en generell forklaring og beskrivelse av deres karakteristikk.

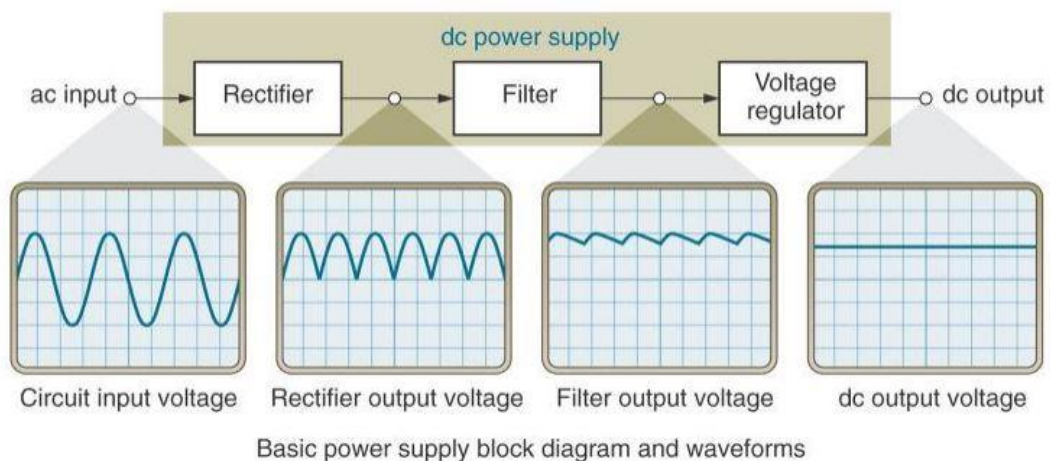
3.1 Enfase diodelikeretter med kondensator

En likeretter har som formål og omformer vekselstrøm til likestrøm. Mye av det moderne elektroniske utstyret får strømtilførselen gjennom enfaset diodelikeretter med kondensator, som vist i Figur 3-1.



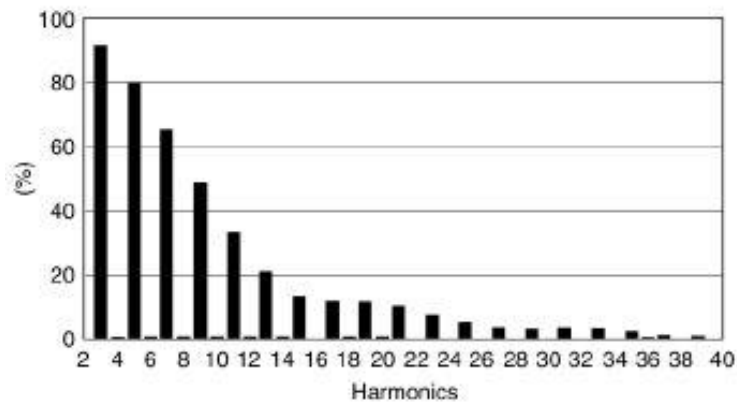
Figur 3-1 Viser enfase diodelikeretter med kondensator.

I [21], er det beskrevet slik som man ser i Figur 3-2 at man har sinusformet spenning som inn signal og likerettes. Det er deretter et filter som er en krets som reduserer variasjoner i spenningen ut fra likeretter. For å få en konstant spenning (likestrøm ut) er det en spenningsregulator som omgjør spenningen ut fra filtret til en konstant spenning. I en slik type konfigurasjon hvor et element er kondensator, vil den «glatte ut» dc-strømmen og- spenningen før den tilføres komponenten. En effekt av at vekselstrømtilførselen lader opp kondensatoren i en del av halvperioden er at strømmen trekkes som pulser med høy amplitude. En del av disse pulsstrømmene inneholder harmoniske verdier som vil kunne skape endringer i spenningens kurveform[16].



Figur 3-2 Grunnleggende likeretter omformere AC-DC [21].

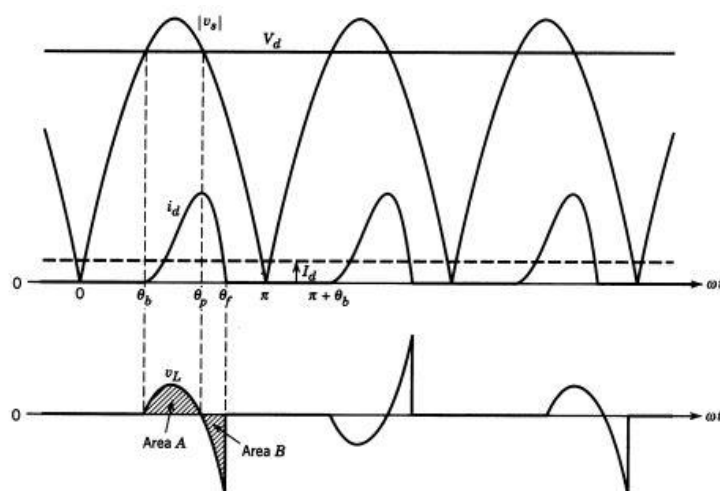
Et vanlig harmonisk spektrum til strømtilførselen i en enfaset diodelikeretter med kondensator ses i Figur 3-3. Den viser at overharmoniske utgjør mest i 3, 5 og 7, og har en innvirkning på grunnharmoniske. I figuren er THDi beregnet til 130% i [16].



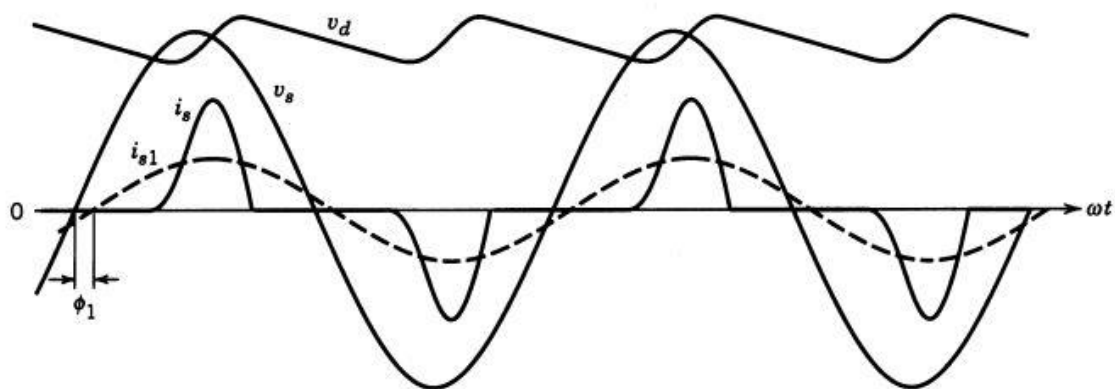
Figur 3-3 Overharmonisk spektrum til strømmen tilført enfaset diodelikeretter med kondensator[16].

Bruken av denne konfigurasjonen er gjeldene for forbrukerelektronikk som datamaskiner, PC-skjermer, batteriladere, hjemmekino, stereoanlegg, printere og lignende. Et annet eksempel kan være batterier som må lades via en konstant DC-spenning, eksempelvis El-biler og lykter. El-bil vil være en av de stre lastene i husstanden, som trekker relativt mye effekt. Et resultat av strømmene i kretsen vil kunne være at overharmoniske forstyrrelser oppstår.

Den karakteristiske oppførselen til en slik likeretter kan ses i Figur 3-4. Figuren viser at når spenningen i kraftsystemet er høyere enn på dioden, starter diodene å lede strømmen i_d / i_s . Figur 3-4 har spenningen V_d konstant DC, og kretsen inneholder en induktans som gjør at strømmen er faseforskjøvet i forhold til spenningen.



Figur 3-4 Spenning og strømkurve for likeretter med en konstant DC-spenningsside [22].



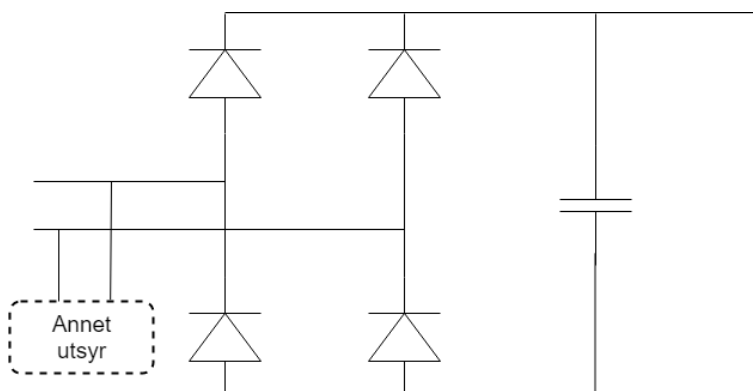
Figur 3-5 Kurveform fra en praktisk diodelikeretter med kondesator simulert i Pspice og den bergnete grunnharmoniske strømkomponenten er vist [22].

Ut ifra Figur 3-1 er diodene i parallell og reguleres slik i diodebroen at det slippes igjennom kun positive perioder eller negative perioder av strømmen, som avhenger av hvilke dioder som er innkoblet i forhold til spenningen v_s . Resultatet viser at man i den simulerte Figur 3-5, når v_s går positiv, går også i_s positiv. Det samme gjelder for den negative perioden for negativ v_s .

På likestrømsiden av likeretteren kan man ha hovedsakelig ha tre ulike typer laster:

- Konstant impedans/resistans
- Konstant effekt
- Konstant strøm

I en impedans belastning vil strømmen bli faseforskjøvet i forhold til spenningen. Når man har konstant effekt eller reistiv krets vil faseforskyvningen på strømmen være minimal eller relativ liten.



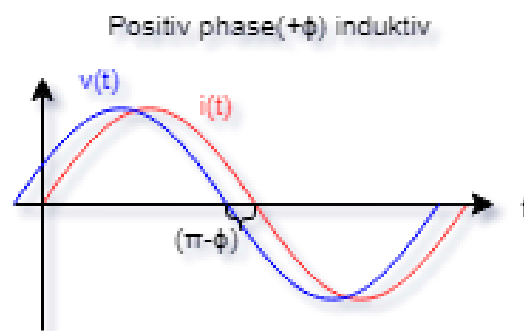
Figur 3-6 Forvregninger av strømkurvene til diodelikeretteren påvirker den tilførte spenningen.

I Figur 3-6 viser hvor bidraget fra annet forbruksutstyr i boligen blir tilkoblet. Utstyr som produserer mye støy og forstyrrelser til kraftnettet forsterkes når mange er tilkoblet,

spesielt i svake nett hvor ledertverrsnitt er lavt og energiproduksjonen kan være svingende[16].

3.2 Impedans belastninger

En type av impedansbelastninger er resistive kretser som er knyttet til elementet R og omtales også som Z ($Z=R$)[23]. Spenningskilden til en slik krets gir en sinusformet vekselspanning og i tillegg vil det gå en sinusformet strøm igjennom kretsen, se Figur 3-7.



Figur 3-7 Kurveform til en typisk impedans last som er induktiv.

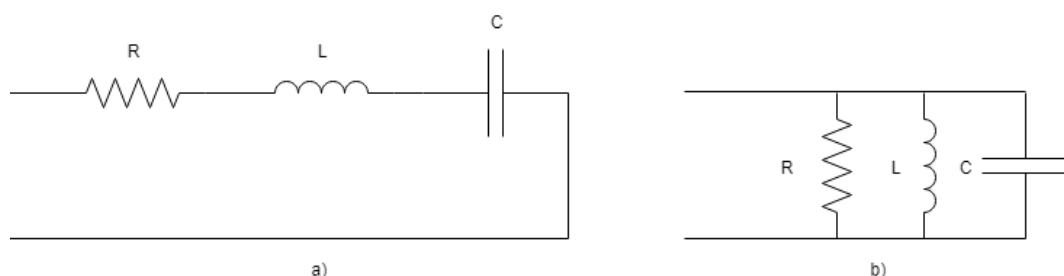
Formler for generelle impedanslaster, for strøm og spenning er vist i (3.1), (3.2) og (3.3):

$$I_B = \frac{S}{U} \quad (3.1)$$

$$I_{B1} = \frac{S}{U \cdot \cos(\varphi)} \quad (3.2)$$

$$U_Z = Z \cdot i \cdot \cos \omega t \quad (3.3)$$

Figur 3-8 viser et enkelt koblingsskjema for RLC-krets. I a) er en seriekobling og i b) er en parallellkobling.



Figur 3-8 Generell serie- og parallell kobling av resistans, induktans og kapasitans.

En impedanslast for eksempel være når den inneholder en resistiv del (se formel (3.4), men må justeres med faseforskyvning. Dette er på grunn av at elektrisk utstyr inneholder kapasitanser, der den imaginære positive delen kan representere induktiv (spole). Dersom kapasitansen er negativ vil den være representativ mot kapasitivt (kondensator).

$$Z = R + jX \quad (3.4)$$

Kretser som inneholder alle disse belastningene er definert som impedans belastning. I formel (3.5) (3.6) er impedansen uttrykt som en funksjon av $j\omega$:

$$Z(j\omega) = R + j\omega L - \frac{1}{j\omega C} \quad (3.5)$$

$$Z(j\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

Der $V(j\omega)/I(j\omega)$ er forholdet mellom spenningen inn og utgangen av strømmen. Nedenfor er impedansen omskrevet til en transferfunksjon.

$$H(j\omega) = \frac{1}{Z(j\omega)} \quad (3.6)$$

$$H(s) = \frac{1}{Z(s)}$$

For modellen som er utviklet i Simulink, beskrevet videre i kapittel 6.4, er formel (3.7) benyttet for beregninger av strømmen:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (3.7)$$

I Tabell 3-1 er en oversikt og oppsummering av tenkelige kombinasjoner av mulige kretsinnhold for impedans belastninger.

Tabell 3-1 Impdans verdier og fase vinkel for varierte kretselement kombinasjoner i AC-kretser.

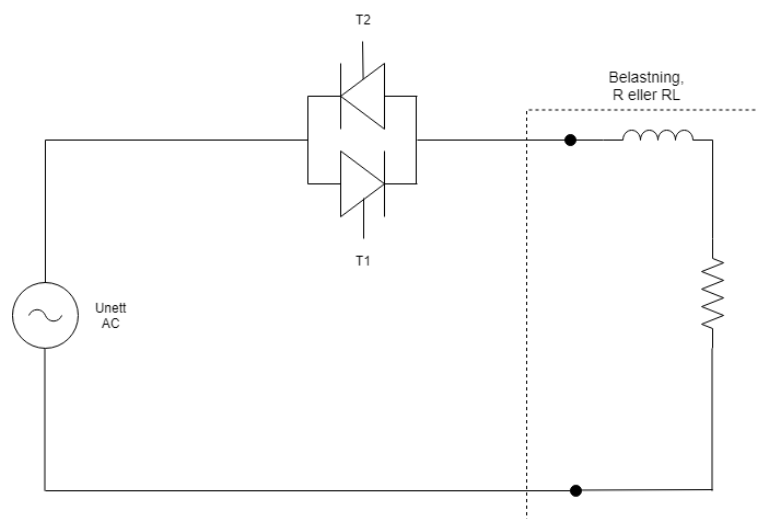
<i>Last elementer</i>	<i>Impedans (Z)</i>	<i>Fase vinkel (ϕ)</i>
<i>R</i>	R	0°
<i>C</i>	X_C	-90°
<i>L</i>	X_L	+90°
<i>RC</i>	$\sqrt{R^2 + X_C^2}$	Negativ, mellom -90° og 0°
<i>RL</i>	$\sqrt{R^2 + X_L^2}$	Positiv, mellom 0° og 90°
<i>RLC</i>	$\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	Negativ hvis $X_C > X_L$, Positiv hvis $X_C < X_L$

For disse typer av utstyr kan en transferfunksjon være aktuelt for å modellere den, siden lasten baserer seg mye på ohmsk lov og andre forstyrrelser relativt lave. Denne transferfunksjonen vil inneholde mest resistanser i kretsen, herunder eksempelvis en elektrisk panelovn som har minimale harmoniske forstyrrelser[16].

3.3 Faseinnsnitt- og faseavsnitt dimming

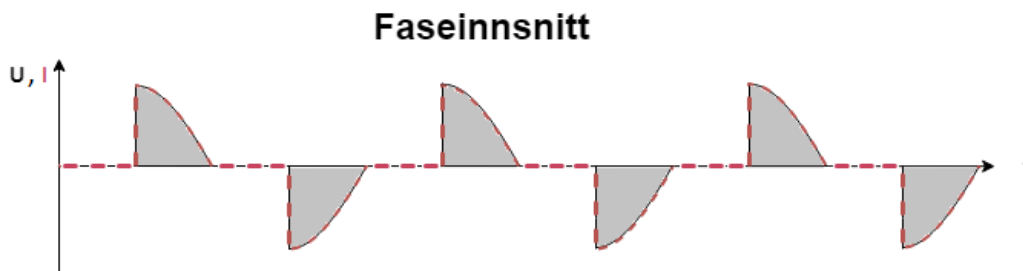
3.3.1 Faseinnsnitt dimming

I en norsk standard bolig benyttes det hovedsakelig to typer dimming av lavspennings belysning, faseinnsnitt- og faseavsnitt dimming. For faseinnsnitt dimming er virkemåten slik at ved å justere styrevinkelene på hver sin thyristor (T1 og T2). I Figur 3-9 slippes strøm igjennom i hver halvperiode, siden thyristorene er koblet i antiparallell. For stasjonære forhold er den positive halvperioden like stor som den negative halvperioden. Om tenningen forsinkes, vil lyset avta i belastningsspenningens kurveform. Faseinnsnitt dimming er en relativ enkel styrekrets og dermed mye brukt. En ulempe ved dimmingen er at det dannes en transient hver gang sinuskurven snittes, og generer støy og radiostøy ved hyppig justeringer av thyristorene. En slik dimming styres av en «triac kobling» eller thyristorene vist på Figur 3-9. En belastning er inkludert (R eller RL), som skal illustrere belysning med eller uten driver til lampen.



Figur 3-9 Faseinnsnitt dimming ekvivalent med R eller RL belastning.

I Figur 3-9 viser spenning- og strøm kurve av faseinnsnitt dimming hvor prinsippet er å justere spenningens styrevinkel før oppnådd toppverdi på den sinusformede spenningen. Kurveformen på strømkurven (i rødt) avhenger av hvilken last som er tilkoblet. Hvis induktans er tilkoblet kretsen, vil strømkurven ha en mer utglattet kurveform enn den ideelle resistive som vist på Figur 3-10. I tillegg vil den være noe faseforskjøvet i forhold til spenningen, U.



Figur 3-10 Faseinnsnitt dimming prinsipp spennning- og strømcurve (ren ideeel resisitiv last).

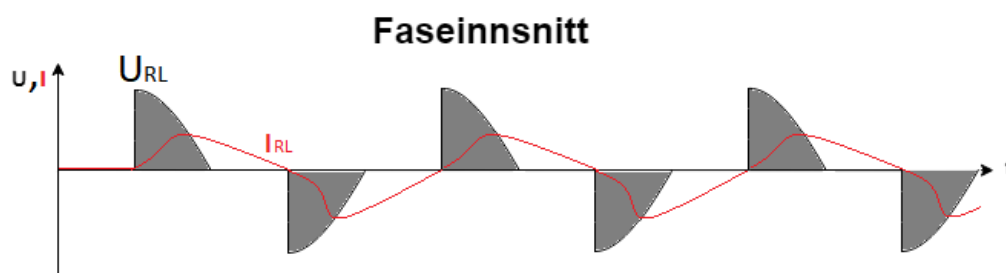
Ved faseinnsnitt dimming justeres styrevinkelen til spenningen på sinuskurven før U har oppnådd toppverdi på spenningen. Denne typen regulering av spenningen brukes i flere tilfeller. Den er mest benyttet for belastninger som har innhold av induktans og resistans. Nettspenningens øyeblikkverdi er uttrykk i formel (3.8):

$$u_{\text{nett}} = U_n \cdot \sin(\omega t) \quad (3.8)$$

Ved å integrere øyeblikkverdien av nettspenningen fra styrevinkelen (α) til gitte halve periodetiden (π), får man uttrykt spenningsforhold over belastningen med hensyn til styrevinkelen i formel (3.9):

$$U_L = u_{\text{nett}} \sqrt{\frac{2\pi + \sin(2\alpha) - 2\alpha}{2\pi}} \quad (3.9)$$

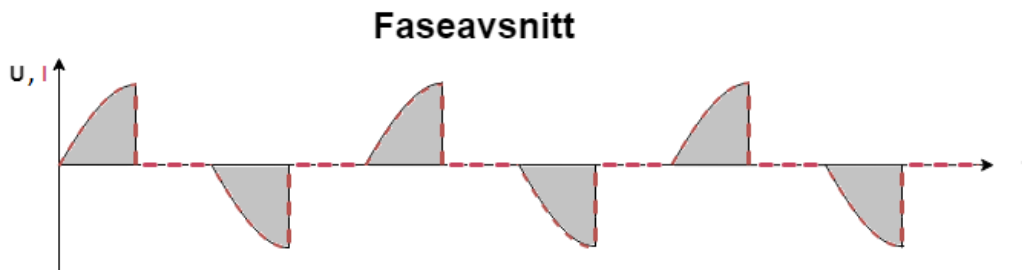
For en krets som inneholder resistans og induktans, vil kurveformen for strømmen bli mer glattet ut (se Figur 3-11). Figuren viser at en liten induktans er inkludert, og derav lite faseforskyvning.



Figur 3-11 Faseinnsnitt dimming prinsipp spennning- og strømcurve for RL last.

3.3.2 Faseavsnitt dimming

Denne typen dimming er primært brukt ved kapasitive laster. I Figur 3-9 vil belastningen byttes ut med kondensator og tyristorene T1 og T2 erstattes med en mosfet transistor på utgangen. Og dimmeren blir ofte kalt «Tronic dimmer» og har egenskapene til en transistor, som raskt regulerer styrevinkelen(α). Faseavsnitt dimming justerer styrevinkelen til spenningskurven etter toppverdien til spenningen. Dette er en av grunnen til at den er best egnet til kapasitive laster. Når man har en kapasitiv last er strømmen faseforskjøvet før spenningen i dens tidsretning. Dette betyr at spenningen justeres i siste halvperiode av sinuskurven og regulerer forholdet mellom spenning og strøm. Ved slik regulering unnvikes kritiske justeringer av spenning og strøm.

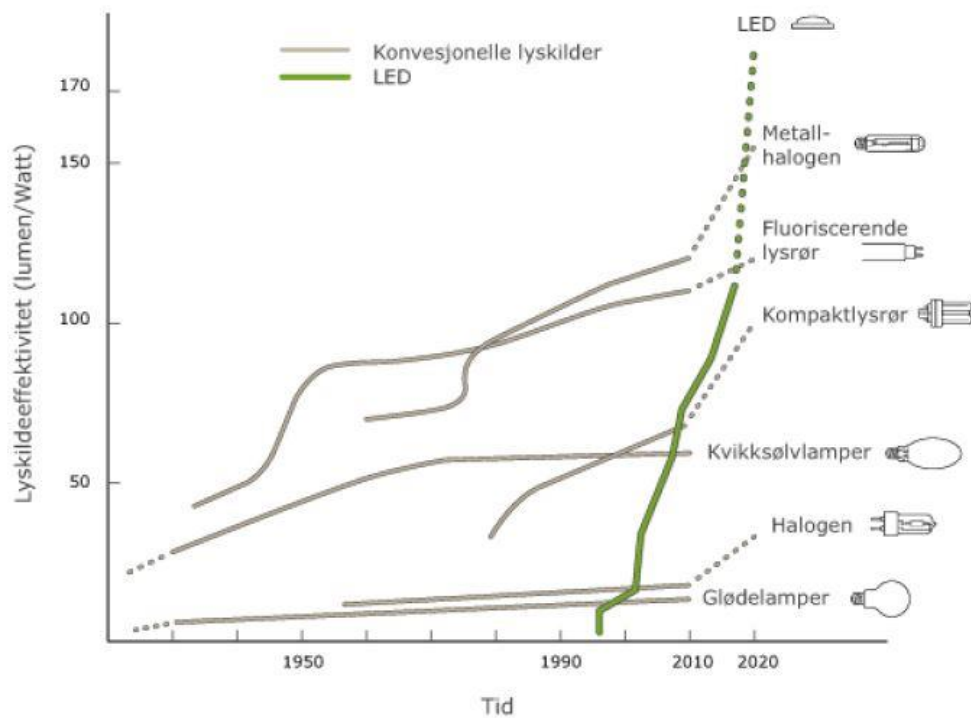


Figur 3-12 Faseavsnitt dimming prinsipp spenning- og strømcurve (ren ideeel resisitiv last).

Fordelene med faseavsnitt kontra faseinnsnitt er en «softstart» som unngår transient ved snitting i sinusformen. På grunn av dette er det ikke benyttet filter på utgangen og er en lydløs dimmer.

På grunnlag av at denne oppgaven omhandler husholdninger i Norge, velger jeg å se bort ifra vanlige glødelamper og andre ohmske laster når jeg skal se på faseavsnitt dimming. Dette på grunnlag av min erfaring som elektriker og observasjon av hva som brukes i norske husholdninger. I tillegg til dette kommer det frem i [24] at det er satt økodesignkrav til belysningsprodukter. I 2012 ble det fremmet et fremtidig forbud av alle glødepærer, noe som fører til en utfasing av tradisjonelle lyspærer.

For husholdninger er det faseavsnitt dimming for LED og elektronisk trafo for lyskilder som anses å være mest aktuelle på markedet. Direktekoblede lyskilder er sjeldent brukt i norske husstander. Gjennom de siste 70-80 årene har det skjedd endringer i lyskilde teknologien, noe Figur 3-13 viser.



Figur 3-13 Utvikling lyskildeeffektivitet til flere ulike typer [24].

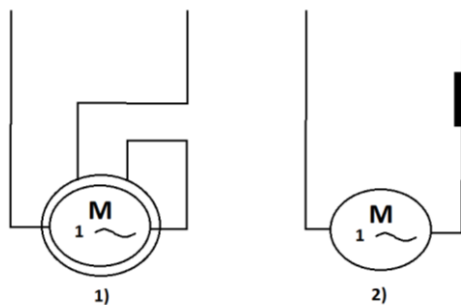
Utviklingen av LED har gått raskt de siste 30 årene, og utviklingen av ulike typer lyskilder illustreres i Figur 3-13. Gjennom denne utviklingen, har LED etablert seg godt i lyskildens marked, noe som kommer av at LED har mange gode fordeler i forhold til de konvensjonelle lyskildene. Noen av fordelene er lang levetid, mekanisk robusthet og et godt design for å nevne noe.

3.4 Motordominerende belastninger

3.4.1 Universalmotoren

Vekselstrømkommutatormaskiner er en type maskin som ofte er knyttet til motorer i husholdningsutstyr[25]. For enfasemotorer finnes universalmotoren, enfaset vekselstrøm seriemotor og repulsjonsmotoren. I [25] skrives det at husholdninger er bruksområdet til universalmotoren. Denne typen er mest brukt i vaskemaskiner, oppvaskmaskiner og tørketromler for å nevne noen. Det er på den andre siden, ingen trefase asynkronmaskiner eller induksjonsmaskiner som er benyttet i stor grad i husholdninger og anses derfor som uaktuelt å ha med i denne oppgaven for modellering av husholdningsapparater. Eventuelle trefase motorer vil høyst sannsynlig være hastighetsregulert av frekvensomformer og vil dermed oppføre seg som en likerettarlast sett fra AC siden til utstyret.

Universalmotoren er benyttet som likestrømmotor og vekselstrømmotor, der den fysiske utformingen er lik, men spenningsforsyningen er annerledes. Inn til motoren kommer en pulserende vekselstrøm, som ofte har en tilknyttet styrekrets for regulering av motorens funksjon mot den modulen utstyret tilhører.



Figur 3-14 Universalmotoren
1) symboltegn 1
2) symboltegn 2

I Figur 3-14 er symboltegnene for universalmotoren, hvis motorstyringen modifiseres slik at polariteten under drift skifter så holdes dreieretningen den samme. Det er noe som fører til at serie eller shunt motoren kan drives med av en vekselspenning[26]. Uttrykket for fluks og ankerstrømmen i motoren:

$$I_a = I_a \sin \omega t \quad (3.10)$$

$$\phi = \phi_{\max} \sin \omega t \quad (3.11)$$

Generelt for alle maskiner er at dreiemomentet i motoren er proporsjonalt med feltet og ankerstrømmen. Dreiemomentet kan uttrykke slik:

$$T = k \cdot \phi \cdot I_a \quad (3.12)$$

, hvor k er maskinkonstant som finnes i maskinens datablad. Seriemotoren har et felt som er proporsjonalt med ankerstrømmen:

$$\varnothing = \frac{E_1}{K_E \cdot n} \quad (3.13)$$

, hvor K_E er maskinkonstant, hvor E_1 i en AC-krets vil ha et uttrykk som:

$$E_1 = U - I_a R_a L_a \quad (3.14)$$

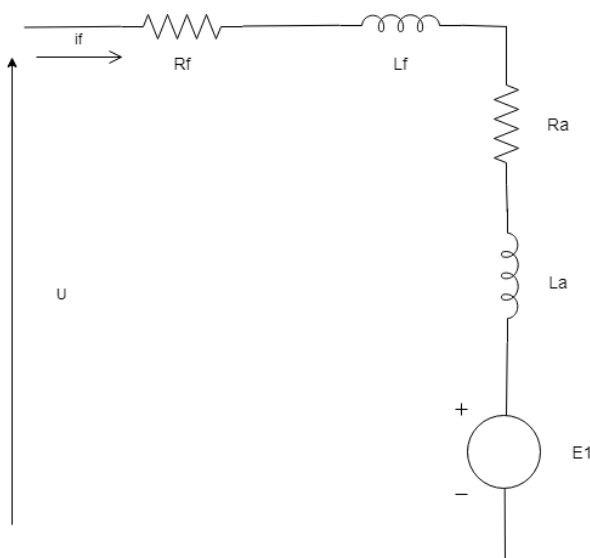
Ved å sette sammen formel (3.12) (3.13) og (3.14) finner man variasjonen i drivmomentet:

$$T = k \cdot \varnothing \cdot I_a = T_{\max} \sin^2 \omega t \quad (3.15)$$

Denne type motor har relativ lav effekt og består av to poler. Disse motorene brukes i blant annet:

- Støvsugere
- Vifter, ofte benyttet i avtrekksvifter på bad eller kjøkken
- Driller
- Kjøkkenutstyr

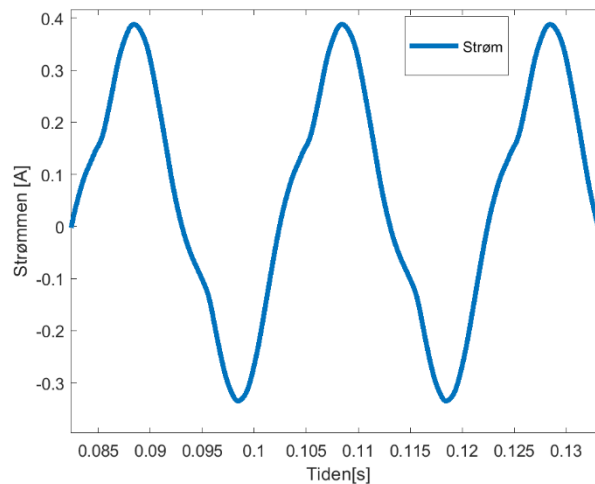
Ett ekvivalentsskjema for universalmotoren er utarbeidet i Figur 3-15. Det skal ses på stasjonære forhold i denne oppgaven, der dynamiske endringer er uaktuelt i forhold til problemstillingen i oppgaven. Denne kretsen kan ses på som impedanskrets med RL, med en motindusert spenning fra E_1 .



Figur 3-15 Skjema for universalmotoren.

, hvor R_a =anker resistansen, L_a = anker induktansen, R_f = felt viklingers resistans, og L_f =feltviklingers induktans.

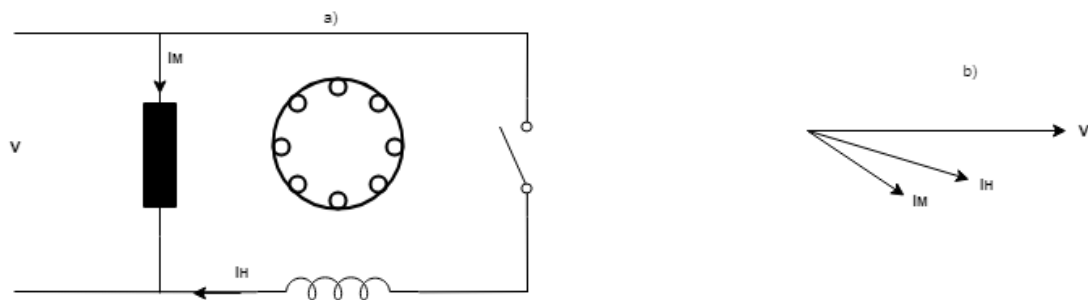
Figur 3-16 viser strømkurven til en motorlast som er en simulert vifte på 36W. Spenningen til denne er sinusformet og er noe faseforskjøvet i forhold til strømmen. Det finnes ulike kurveformer for disse belastningene, men her er det valgt å legge ved et eksempel ved normale driftsforhold og for en tilfeldig periode.



Figur 3-16 Målt strømkuren til en vifte på 36W.

3.4.2 Enfaset asynkron motor; hjelpefasemotoren

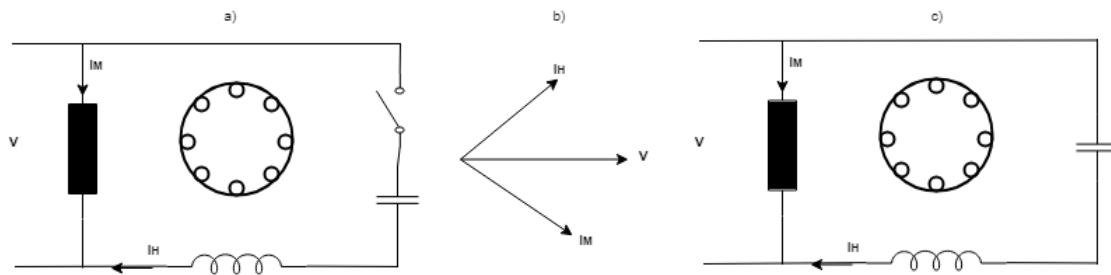
I Figur 3-17 er koblingsskjema for hjelpefasemotor med motstandsstart, med viserdiagram når denne motoren starter. Man ser på viserdiagrammet at strømmen er typisk induktiv både i arbeidsviklingen M og i hjelpeviklingen H, med aksene som er forskjøvet 90° elektriske grader langs omfanget.



Figur 3-17 Motstandsstart av en faset asynkronmotor. a) Kobling b) Viserdiagram ved start.

Resultatet av plassering av viklingene i en slik formasjon er at altså en roterende fluks som gjør at motoren starter[25]. Rotasjonsretningen på motoren kan følgelig forandres ved at hoved-eller startviklingen kobles om. Under normale driftsforhold kobles hjelpeviklingen ut etter å ha oppnådd omdreiningstall. Vanlige bruksområder er vifter og kjøkkenutstyr med middels eller lavt startmoment.

I Figur 3-18 er koblingsskjema og viserdiagram til en lignende motortype, kun tilført med en kondensator. Denne motortypen er bedre egnet til høyere startmoment grunnet kondensatorens oppnåelse av faseforskyvning.



Figur 3-18 Enfasemotor med kondensator. a) Med startkondensator b) Viserdiagram for motor med startkondensator. c) Motor med permanent kondensator.

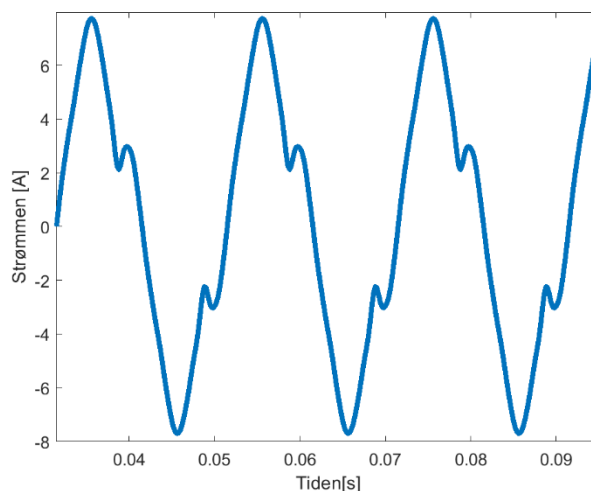
Når Figur 3-18 c), har fast driftskondensator innkoblet vil hjelpeviklingen oppnå bedre effektfaktor og mindre momentpulsasjoner. Dette vil si at driftsforholdene og egenskapene for motoren er bedre enn i hjelpefasemotor med motstandsstart.

3.5 Andre ulineære belastninger

For ulineære laster er karaktereistikken annerledes enn for en lineær lasttype, der formen til de ulike lastene kan varierer. Eksempler på andre ulineære laster:

- Kompaktlysrør
- Mikrobølgeovner
- Direkte koblet lysrør
- Lysarmaturer med reaktor og tenner
- Oppvaskmaskin

Nedenfor er en typisk belastningskurveform som fraviker sinusformet strøm. I Figur 3-19 er det strømkurven til en mikrobølgeovn på 1.15 kW. Denne typen last har ulineære kurveform og forvrenginger, og er definert som andre ulinære belastninger.



Figur 3-19 Strømkurve til målt mikrobølgeovn på 1,15 kW.

4 Analyse av lasttypene og krav til simuleringer basert på utviklede modeller i Simulink

I dette kapittelet skal det gjennomføres en analyse av lasttypene og evalueres hvor mange overharmonisk frekvenser som er nødvendig å ta med for god kurveformrekonstruksjon, samt evalueringer av frekvensspekteret til ulike belastninger.

4.1 Analyse av likeretter

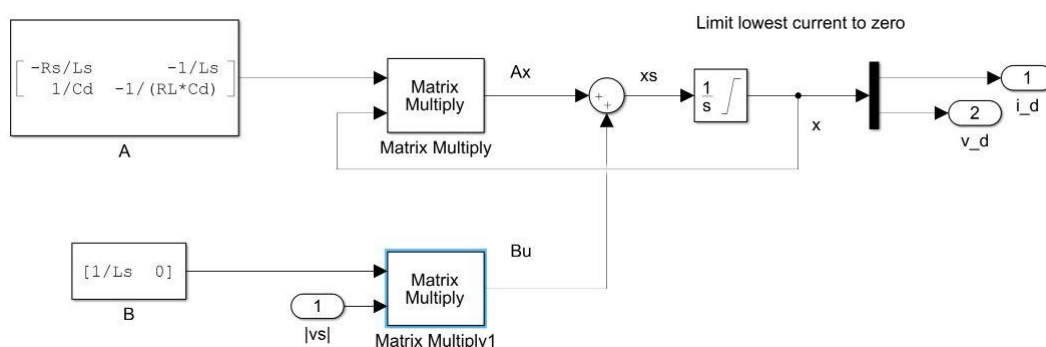
En analyse av likeretter med kondensator er gjennomført i dette kapittelet, og i slutten av kapittelet settes det opp krav til metoden. Det er bygget en generell likerettermodell i Simulink som er simulert for å verifisere den med algoritmen. For å sjekke en metode ved gjenskapning av kurveformer er det utført simulering der amplituder, spenninger og strømmer er kjent.

4.1.1 Matematisk modell i Simulink

Den matematiske modellen som ligger til grunn i likerettermodellen vil framstilles i dette delkapittelet. Denne modellen gjelder til grunnlag for likeretterbelastning og faseavsnitt dimming av likeretterbelastning. Modellen er basert på matrisene i formel (4.1):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ v_d \end{bmatrix} = Ax + Bu = \underbrace{\begin{bmatrix} -R_s/L_s & -1/L_s \\ 1/C_d & -1/(R_L \cdot C_d) \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} i_d \\ v_d \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 1/L_s \\ 0 \end{bmatrix}}_B |v_s| \quad (4.1)$$

Den komplette modellen framstilles i Figur 4-1 der absolutt verdien av v_s er inngangen til modellen, i_d og v_d er utgang fra modellen.



Figur 4-1 Matematisk modell til likeretter.

Det er konstruert et filter på vekselstrømsiden av enfaselikeretteren, disse parameterne er illustrert i Tabell 4-1.

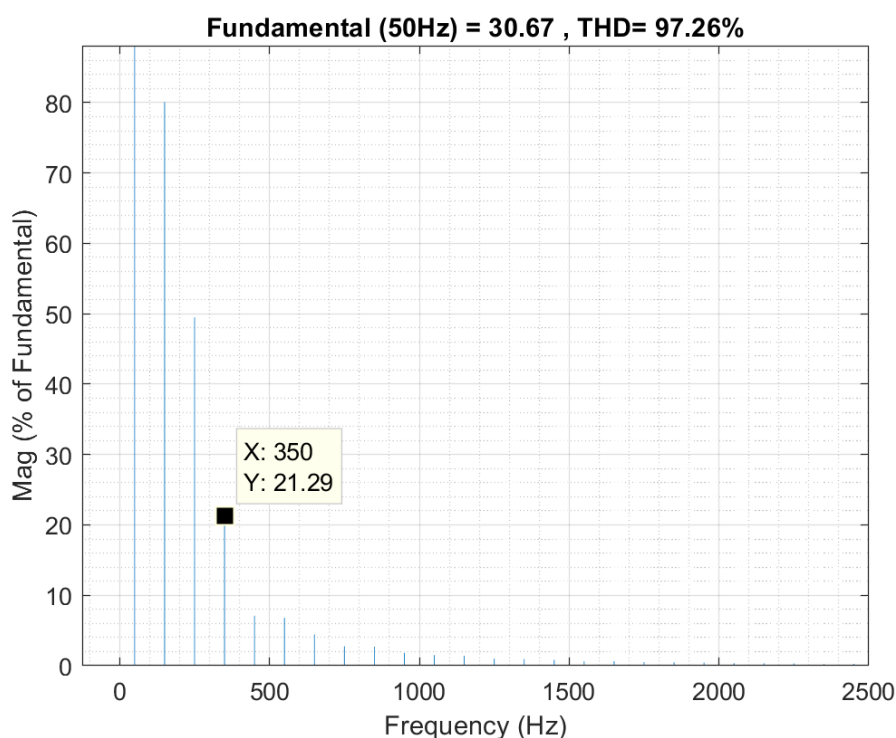
Tabell 4-1 Parameter for likeretter modell.

Parameter	Verdi
L_s	1 [mH]
R_s	1 [m Ω]
C_d	1 [mF]
R_L	20 [Ω]

Disse parameterne er framstilt for å få en tilnærmet praktisk likeretter. Det vil si via simulering av denne modell observeres det at spenningskurver og strømkurver oppfører seg som en typisk likeretterbelastning. Den matematiske modellen på Figur 4-1 er gitt av veileder.

4.1.2 Frekvensspekter relativ til den grunnharmoniske

Frekvensspekteret til en simulert typisk enfasediodelikeretter med kondensator er beregnet og framvist plot i Figur 4-2. I figuren er frekvensen relativ til dens strøm spekteret i rms-verdier, beskrevet i prosent. I tillegg er det beregnet den totale harmoniske forstyrrelsen (THD) ut ifra simulerte verdier.



Figur 4-2 Frekvensspekteret til den simulerte enfasediodelikeretter.

Ved modelleringer og rekonstruksjon av signaler via programmering i matlab, se vedlegg A, er det flere gjenskapte kurveform. Prosent i forhold til den grunnharmoniske (50Hz) er

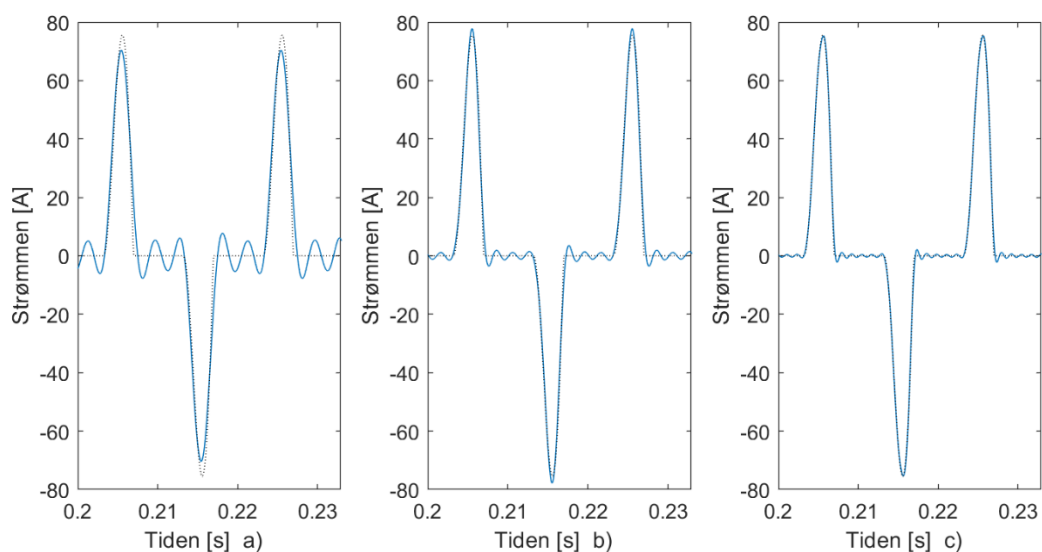
framvist på y-akse, mens frekvensspekteret langs x-akse. Dette gir en indikasjon på hvor mange frekvenskomponenter som behøves for at den rekonstruerte kurveformen har likt utgangspunkt som den simulerte modellen i Simulink.

Figur 4-2 viser frekvensen på 350 Hz, vist som X:350 i figuren på 21.29 % av den fundamentale frekvensen. For eksempel ved 5 overharmoniske, som tilsvarer 250Hz og dekker de to første søylene i frekvensspekteret. Dette kan gi en indikasjon av at det ikke er tilstrekkelig for rekonstruksjon av kurveform og modellkrav.

4.1.3 Evaluering av antall overharmoniske ledd i rekonstruerte kurveform

For å evaluere antall overharmoniske som skal tas med i modellen er det kjørt flere analyser i Matlab/Simulink. Disse analysene er sammenlignet med den simulert enfaselikeretter fra Simulink for å evaluere antallet av frekvenskomponenter, kvadratisk avvik, og kumulativt avvik på den rekonstruerte kurven. Det er avgjørende å ha et antall frekvenser for å kunne få gjenskjapt kurveformer.

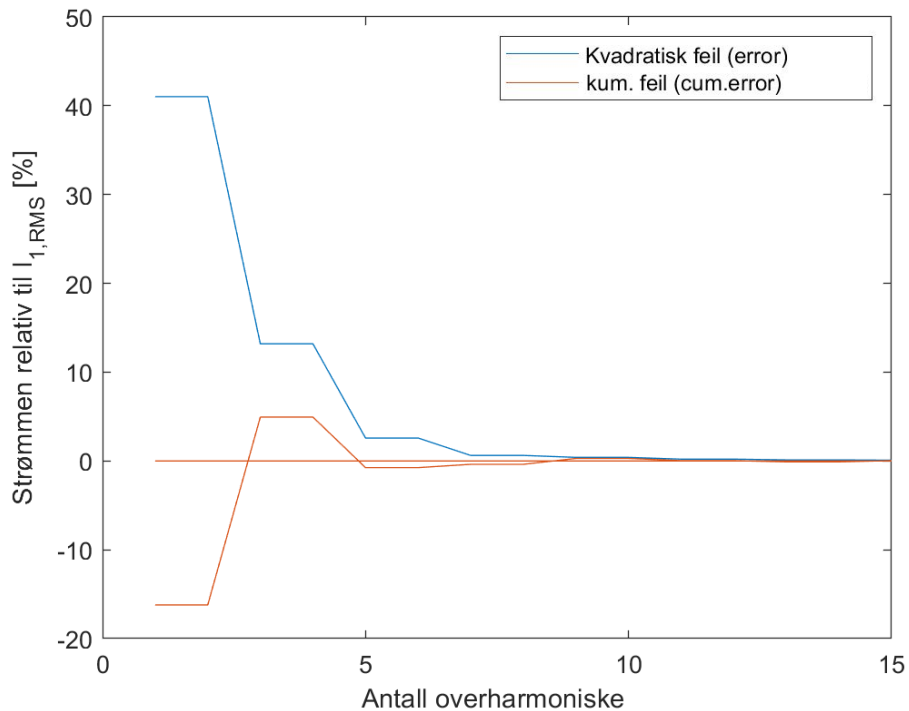
En generell forklaring fra kurveskapning er; desto høyere frekvens og koeffisient ledd man har i en fourierrekke; jo mer blir den lik den identiske kurven som ønskes å simuleres. Ulempe med for mange koeffisienter kan være at simuleringer for modellen tar for lang tid og blir ikke egnet til den bruken som er ønsket.



Figur 4-3 Viser antall overharmoniske; a) 250Hz, b) 500Hz, c) 750 Hz.

I Figur 4-3 ser vi den rekonstruerte kurveformen i blå farge, og den simulerte fra Simulink i grå (se Figur 4-3 a)). Det man kan merke seg ved i a), 5 overharmoniske viser at amplituden ikke er tilfredsstillende i Ampere, som gjør at denne utelukkes, og ikke gjenskaper god nok kurveform ved 250 Hz.

Ut ifra kurveformen vist i Figur 4-3 ser det ut til at amplituden er tilfredsstillende ved både 10 og 15 overharmoniske, det er noe mer oscilleringer ved nullgjennomgang ved 500 Hz, noe som gjør at 750 Hz mer foretrukket for denne type belastning.



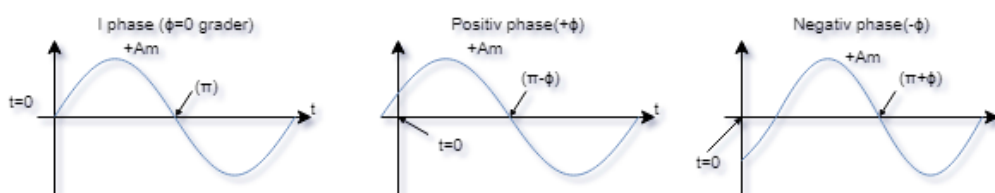
Figur 4-4 Viser avvik og feil opp til 15 overharmoniske relativ til strømmen.

Figur 4-4 viser avviket kumulativt og kvadratisk, for 10 overharmoniske, er kumulativt avviket 0.29 %, mens det kvadratiske avviket er på 0.41 %. Ut ifra avvikene sammenlignes det kumulativt avviket på 15 overharmoniske til 0.039 % og kvadratiske avvik på 0.085 %. Verdier på strømmens relativ til $I_{1,RMS}$ er betydelig lavere, kun ved 5 overharmoniske mer. Fra dette velges det å benytte minst 750 Hz for denne type belastninger.

4.2 Analyse av impedans belastninger

Vurderingen i dette kapitlet er noe enklere enn foregående del-kapittel. Grunnen til dette er en sinusformet kurve, med relative små forstyrrelser og avvik. Det vil si at for å få gjenskapt kurveformen til impedansbelastninger er kun den grunnharmoniske som nødvendig for rekonstruksjon i metoden som er benyttet.

Faseforskyvning oppstår når vekselstrømkretser inneholder induktanser og kapasitanser, som nevnt i kapittel 3.2, og illustrert i Figur 4-5. Når det er i kun ohmsk belastning, vil både strøm og spenninger være sinusformede.



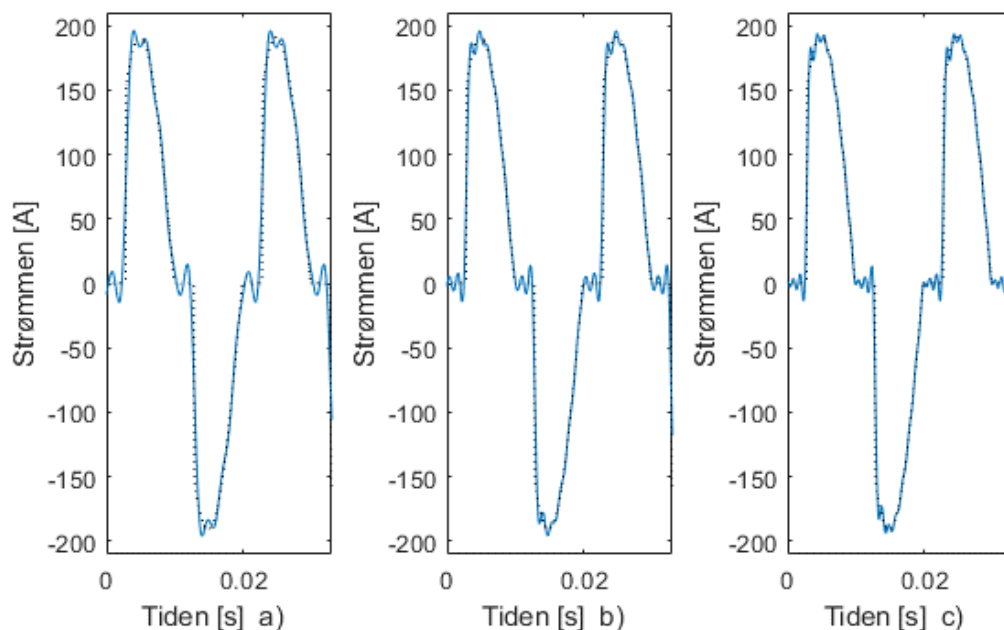
Figur 4-5 Sinusbølgeform med positiv- og negativ faseforskyvning.

4.3 Analyse av faseinnsnitt dimming

4.3.1 Evaluering av antall overharmoniske ved en faseinnsnitt dimming krets med resisitiv belastning

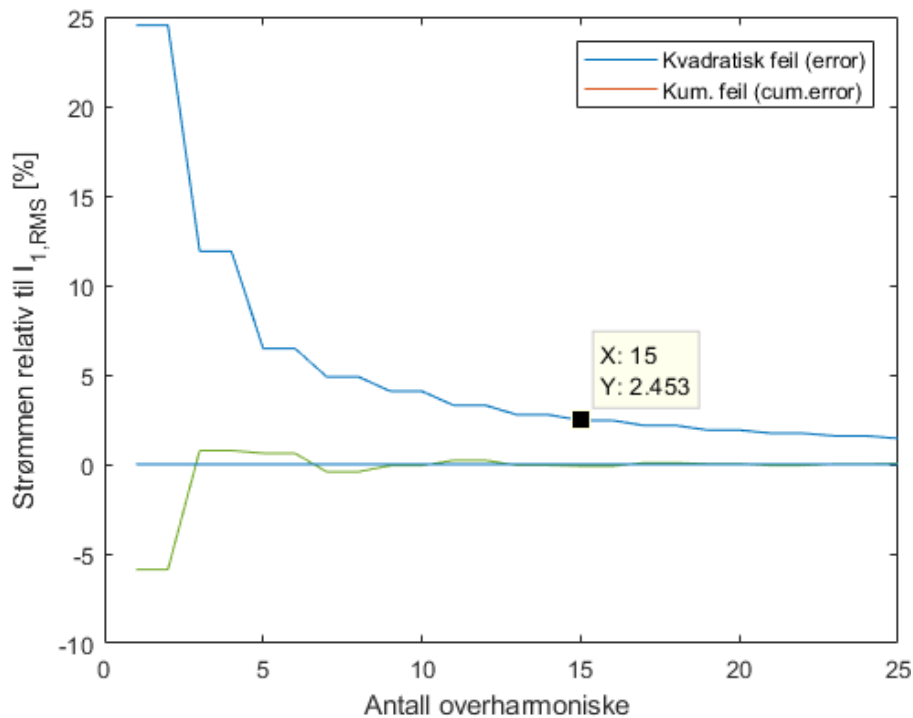
For å kunne evaluere antall overharmoniske som skal benyttes er det gjennomført flere analyser i Matlab. Disse analysene er sammenlignet med en resisitiv belastning, hvor deler av sinusformede kurven er satt til null for å skape så brå endring i strømkuven som mulig. Som nevnt i kapittel 3.3 er endringen i U_R før oppnådd toppverdi, og slik er også modellen i Matlab framstilt. Dette er en brå tilnærming, som er vanskelig å få til i et praktisk faseinnsnitt dimming, derav er denne vanskeligere å gjenskape, enn i en kurveform med mindre brå endringer (for eksempel praktisk faseinnsnitt dimming). En reel belastning vil være mer utglattet kurveform.

I Figur 4-6 ser vi den rekonstruerte kurveformen i blå farge, og den genererte sinuskurven fra Matlab i mørk prikket linje. Som illustrert i Figur 4-6 a) der 10 overharmoniske treffer ikke kurvene godt nok mellom toppverdi av amplituden og før ved nullgjennomgang. Kurveformene i b) og c) er relativt like, noe mer oscellering ved toppverdi og nullgjennomgang ved b), dette utgjør ikke store avvikene som ses i Figur 4-7.



Figur 4-6 Viser antall overharmoniske; a) 500 Hz, b) 750Hz, c) 1000 Hz.

Figur 4-7 er avvikene til kurveformen på den rekonstruerte kurven relativt lik i forhold til den genererte resistive kurven fra Matlab.



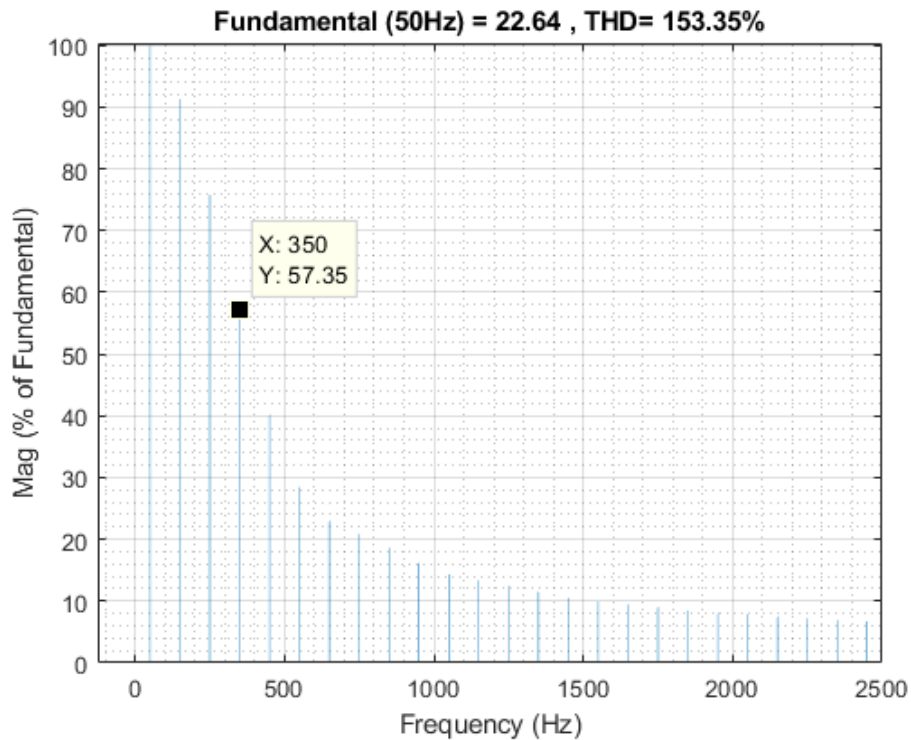
Figur 4-7 Viser kvadratisk og kumulativt avvik opptil 25 overharmoniske.

Figur 4-7 viser avviket kumulativt og kvadratisk, for 10 overharmoniske, er kumulativt avviket er -0.07 %, mens det kvadratiske avviket er på 4.08 %. Ut ifra avvikene sammenlignes det kumulativt avvik på 15 overharmoniske til 0.09 % og kvadratiske avvik på 2.453 %. Mens ved 20 overharmoniske er kumulativt avvik på 0.03 % og kvadratiske avvik på 1.9 %. Verdier på strømmens relativ til $I_{1,RMS}$ er betydelig lavere, kun 5 eller 10 overharmoniske mer, men siden denne sammenligningen er en sinusformet med deler av kurven satt til null og er ingen praktisk eller reel belastning, velges det å benytte 750 Hz for denne type belastninger.

4.4 Analyse av faseavsnitt dimming

4.4.1 Frekvensspekter relativ til den grunnharmoniske i faseavsnitt dimming

Frekvensspekteret til et simulert faseavsnitt enfasediodelikeretter og dens THD verdier i Figur 4-8. I denne figuren er frekvensen relativ til strømspektrumet i effektivverdien (RMS) (engelsk: «root mean square»).

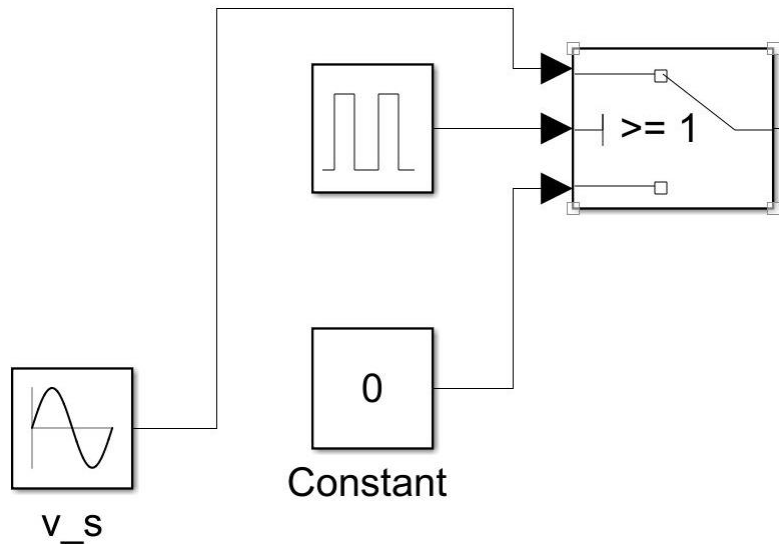


Figur 4-8 Frekvensspekteret til den simulerte faseavsnitt enfasediodelikeretter.

I Figur 4-8 er den grunnharmoniske hundre prosent til strømmens spektrum. Frekvensen på 350 Hz, vist som X:350 i figuren, viser 57.35 % av den fundamentale frekvensen. For eksempel ved 5 overharmoniske, som tilsvarende 250 Hz, dekker de to første søylene frekvensspekteret, noe som kan gi en indikasjon på at dette ikke er tilstrekkelig for gjenskapning av kurveform.

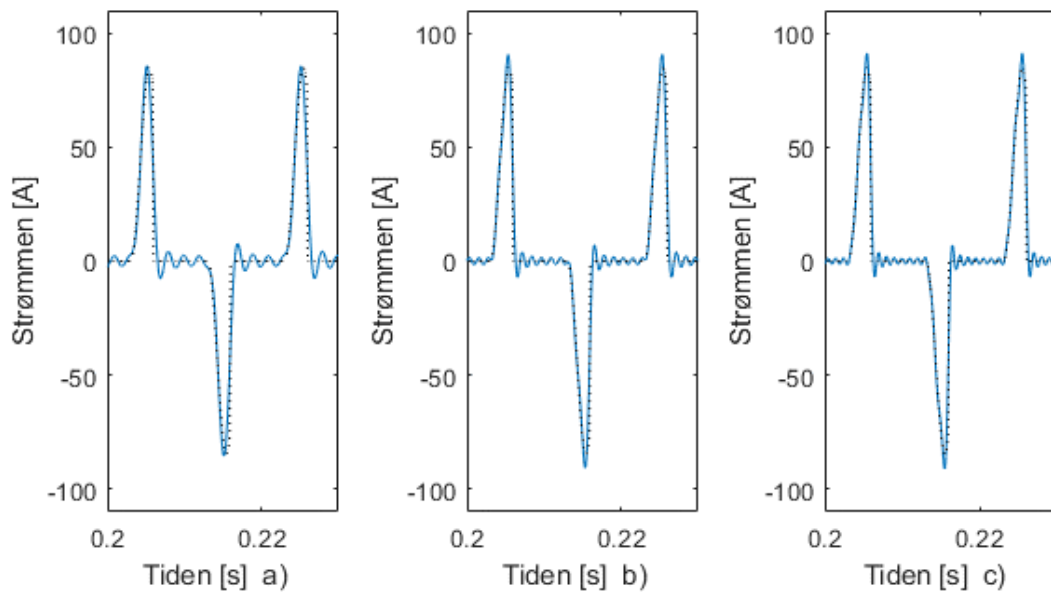
4.4.2 Faseavsnitt dimming med typisk likeretter belastning

Som i tidligere kapitler er det foretatt en analyse i Matlab for evaluering av antall overharmoniske som skal tas med i modellen. Disse analysene er sammenlignet med et faseavsnitt dimmerkrets med enfaselikeretter belastning i Simulink. Det er benyttet en «Switch» blokk, med tre innganger; puls generator, konstant ledd og sin generator som vist i Figur 4-9.



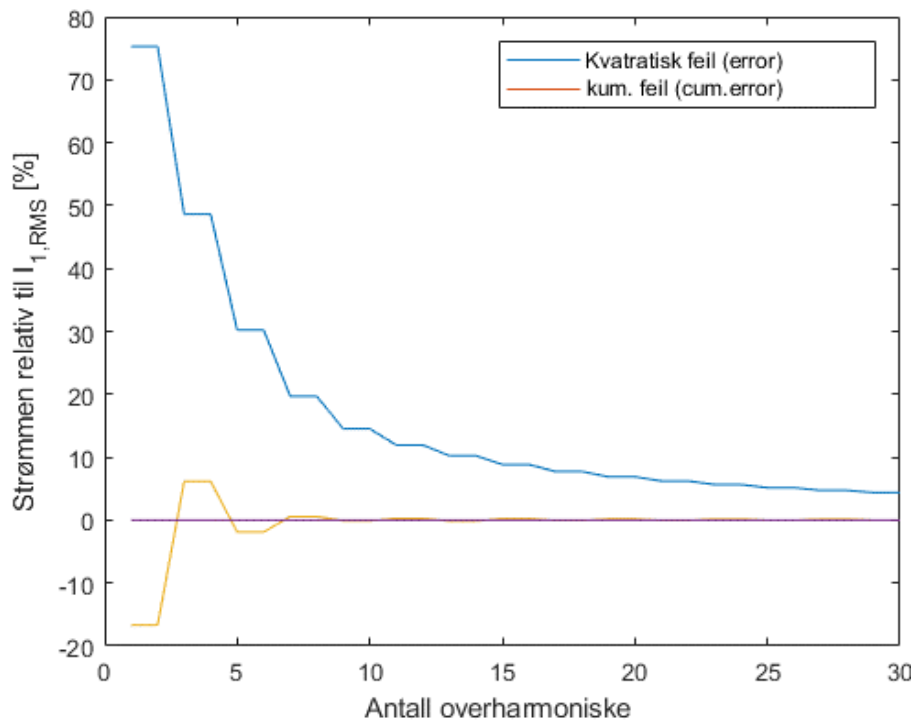
Figur 4-9 Faseavsnitt kontroll i simulering.

Videre er den rekonstruerte kurven sammenlignet med den simulerte fra Simulink i Figur 4-11.



Figur 4-10 Viser antall overharmoniske; a) 750Hz, b) 1000Hz, c) 1250 Hz.

Ut ifra kurveformen i Figur 4-11 Viser avvik og feil opptil 30 overharmoniske ser det ut til at oscilleringer ved nullgjennomgang ikke er tilfredsstillende ved 15 overharmoniske og fraviker ved toppverdi. I a) og b) er amplituden litt for høy i forhold til den simulerte. På den andre siden viser Figur 4-11 at kvadratisk og kumulativt avvik ikke fraviker mye og er innenfor marginene.



Figur 4-11 Viser avvik og feil opptil 30 overharmoniske.

Figur 4-11 har et kvadratisk avvik på 3.59 % og kumulativt avvik på 0.05 % ved 15 overharmoniske. Utefra faseinnsnitt dimmingen er dette kvadratiske avviket litt for høyt, der man konkluderte med under 3 %. Ved 20 overhamoniske er det kvadratiske avviket på 2.8 % og kumulativt avvik på 0.38 % som tilfredsstillter under 3 prosent og det er derfor foretrukket 20 overharmoniske for denne type belastning.

4.5 Oppsummering og diskusjon

Gjennom dette kapittelet er det utført analyse av ulike typer laster for å avdekke kravet til antall overharmoniske komponenter og ledd i fourier-rekken. Samtidig er det utført en evaluere frekvensspekteret til de mest krevende belastningene. Etter dette anses diodelikeretter belastninger, faseinnsnittbelastninger og faseavsnittbelastninger de mest ekstreme lastkurvene, dermed vanskeligst å rekonstruere signalet til i Simulink. På grunnlag av dette anser man at disse belastningstypene skal dekke de andre typene når det kommer til antall overharmoniske komponenter og ledd i fourier rekken. En kort og oversiktlig oppsummeringsliste er vist nedenfor:

- Kravet er 15 overharmoniske(750Hz) fra analyse av likeretterbelastning.
- Kravet er grunnharmoniske fra analyse av impedansbelastninger.
- Kravet er 15 overharmoniske(750Hz) fra faseinnsnitt dimming.
- Kravet er 20 overharmoniske (1000Hz) fra faseavsnitt dimming med likeretterbelastning.

Fra de nevnte punktene ovenfor, velges det å ta med 20 overharmoniske, altså 1000 Hz for modellen med den valgte metoden i Simulink/Matlab. Når man videre skal etablere

Matlab koder for modellen og Simulink blokker for rammeverk, er det 20 overharmoniske komponenter som er utgangspunktet og videre kravet for simuleringsmodellene.

5 Spenningsvariasjon

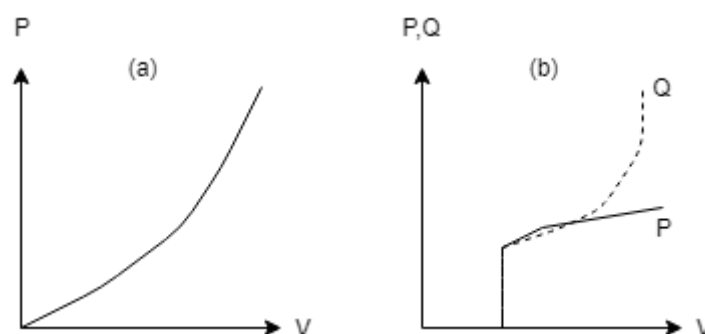
5.1 Teori for spenningsvariasjon

Hos forbrukere i lavspenningsnett distribusjon, der husholdninger oftest er tilkoblet i kan det oppstå variasjoner i nettet. Dette kan være på grunn av inn- og utkoblinger av produksjonsenheter eller andre momenter i last- og produksjonsendringer. Det kan også oppstå flimmer i strøm- eller spenningsvariasjoner med frekvenser under 50 Hz, der nominell frekvens i Norge er 50Hz. Noen grunner til dette kan være produsert effekt varierer hurtig i svake distribuerte lavspenningsnett.

Spenningskvalitet ved drift av kraftsystemet har krav på $\pm 10\%$ av nominell spenning i tilknytningspunktet i lavspenningsnettet inn til boligen [27]. Det betyr at nettselskapet er pliktig til å oppretthold spenningskvaliteten innenfor disse kriteriene oppgitt i effektivverdi.

Belysningsutstyr og motorer er mer avhengige av korrekt spenningskvalitet enn andre typer utstyr i boligen, for eksempel panelovner [28]. Tradisjonelle lyspærer er mest benyttet i boliger[28], mens fluorescerende eller utladningsbelysning er mest benyttet i industri og næringsområder. Tradisjonelle lyspærer forbruker ingen reaktiv effekt og er kun resistiv og er derfor frekvensuavhengig som vises i Figur 5-1a.

Fluorescerende- eller utladningsbelysning er en av de laster som er sterkt avhengig av god spenningskvaliteten. Når spenningen faller under 60-80% av nominell spenning, vil den falle ut og starte på nytt etter 1-2 sekunder forsinkelse når spenningen er over tenningsnivået til belysningen [28]. Når spenningen er over tenningsnivået, varierer den reelle og reaktive effekten som vist i Figur 5-1b.



Figur 5-1 Spenning karakteristikk for: (a) lyspære; (b) utladende belysning.

5.2 Andvendte last modeller

5.2.1 Konstant Impedans/Strøm/Effekt

Konstant Impedans/Strøm/Effekt (ZIP) modellen er en av de mest brukte modellene for å fremstille oppførselen på aktiv- og reaktiv effekt avhengig av spenningsvariasjon (og/eller frekvensen). Den består av primært tre elementer[29]:

- En konstant impedans (Z)
- En konstant strøm (I)
- En konstant effekt (P)

Formel (5.1) viser uttrykket for ZIP-modellen[1]:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left[\underbrace{a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2}_{Z_{\text{konst}}} + \underbrace{a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)}_{I_{\text{konst}}} + \underbrace{a_3}_{P_{\text{konst}}} \right] \\ Q &= Q_0 \left[\underbrace{a_4 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2}_{Z_{\text{konst}}} + \underbrace{a_5 \left(\frac{V}{V_0} \right)}_{I_{\text{konst}}} + \underbrace{a_6}_{P_{\text{konst}}} \right], \end{aligned} \tag{5.1}$$

der V_0 , P_0 og Q_0 er gitte startverdier ved normale driftsforhold. Polynom parameterne av ZIP-modellen er koeffisientene (a_1 til a_6) som gir effekt faktoren for belastningen [28]. For den detaljerte informasjonen til last-forbruket, er den aktive effekt vanligvis representert ved konstant strøm(I), mens den reaktive effekten er representert via en konstant impedans (Z).

5.2.2 Konstant Impedans/Strøm/Effekt med hensyn på strømmens øyeblikksverdi

Denne ZIP modellen kan skrives om med hensyn til strømmen, der P og Q, erstattes med strømmens øyeblikksverdi som er en kompleks variabel. Ved omskriving av likning (5.1) er ZIP-modellen med hensyn på strømmen vist i formel (5.2):

$$I = I_0 \left[\underbrace{a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)}_{Z_{\text{konst}}} + \underbrace{a_2}_{I_{\text{konst}}} + \underbrace{a_3 \left(\frac{V_0}{V} \right)}_{P_{\text{konst}}} \right], \tag{5.2}$$

I [28] skrives det at ZIP-modellen ikke vil være gyldig hvis spenningen på belastningen faller under 0.7 per unit. Det vil si at den er gyldig mot spenningsfall på 30%. Dette er innenfor de spenningsvariasjonene som skal ses på i denne oppgaven og dermed er formel (5.2) gyldig som bekreftet ved simuleringer i Figur 5-2. Metoden benyttes ved at man setter koeffisientene før selve modellen, når man vet hvilken type belastning.

5.3 Påvirkning av spenningsvariasjoner på modellen

Årsakene til spenningsvariasjon er nevnt ovenfor, i dette avsnittet er vurderinger av spenningsvariasjoner med den valgte metoden i formel (5.2). Følgende arbeidstrinn er utført for å verifisere modellen mot spenningsvariasjon:

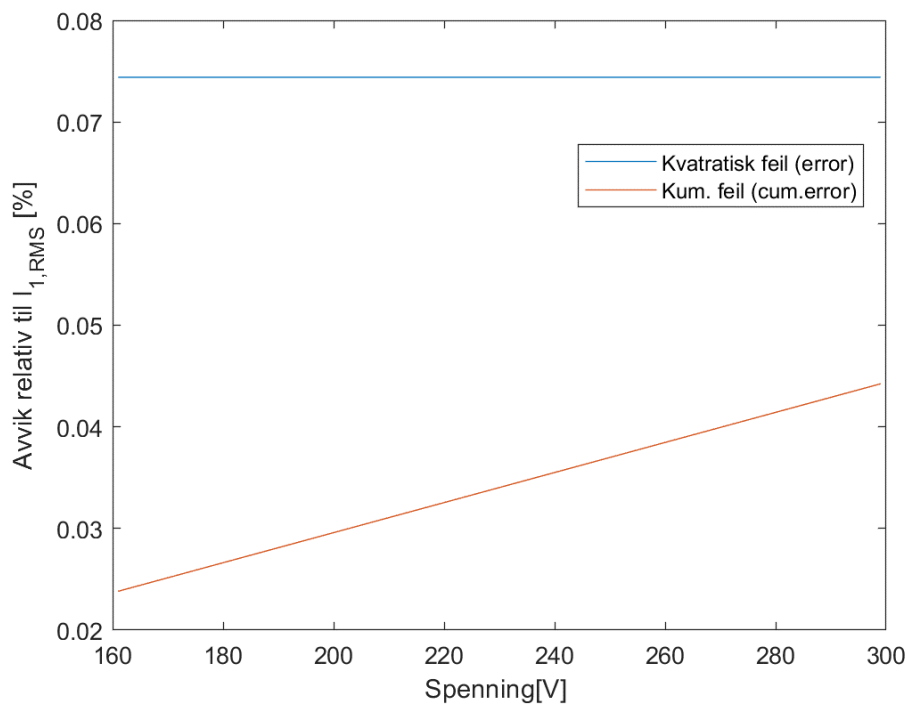
- 1) Utgangspunktet: Modellert og simulert likeretter med RC belastning i Simulink.
- 2) Inngangen til modellen er effektivverdien av 230V spenningskilde.
- 3) Utgangen på modellen er spenning og strømmen, der strømmen er rekonstruert via fft koeffisienter med inngangsspenning på 230V.

Videre er det utviklet et Matlab-script som tar for seg endring i spenningen, som vist i Tabell 5-1. Dette scriptet tar utgangspunkt i verdiene fra den originale simuleringen ved 230V rms og skaper i det nye scripet spenningsvariasjoner $\pm 30\%$ av nominell spenning, se vedlegg A.

Tabell 5-1 Oversikt til Figur 20 spenningsvariasjoner $\pm 30\%$ av nominell spenning.

<i>Simulering</i>	<i>Spenningsavvik [%]</i>	<i>Spenning [ΔV]</i>
1	-30	161
2	-25	172.5
3	-20	184
4	-15	195.5
5	-10	207
6	-5	218.5
7	0	230
8	+5	241.5
9	+10	253
10	+15	264.5
11	+20	276
12	+25	287.5
13	+30	299

I Figur 5-2 er det avvik i forhold til spenningsvariasjon ved den gjenskapte strømmen via (eng: Fast fourier transform) metoden, der spenningen endres via script i Matlab og simuleringen i Simulink. Det tas utgangspunkt i endring i spenningen ved V/V_0 . Utdypet i kapittel 5.2.2 for ZIP-modellen med hensyn på strømmen.

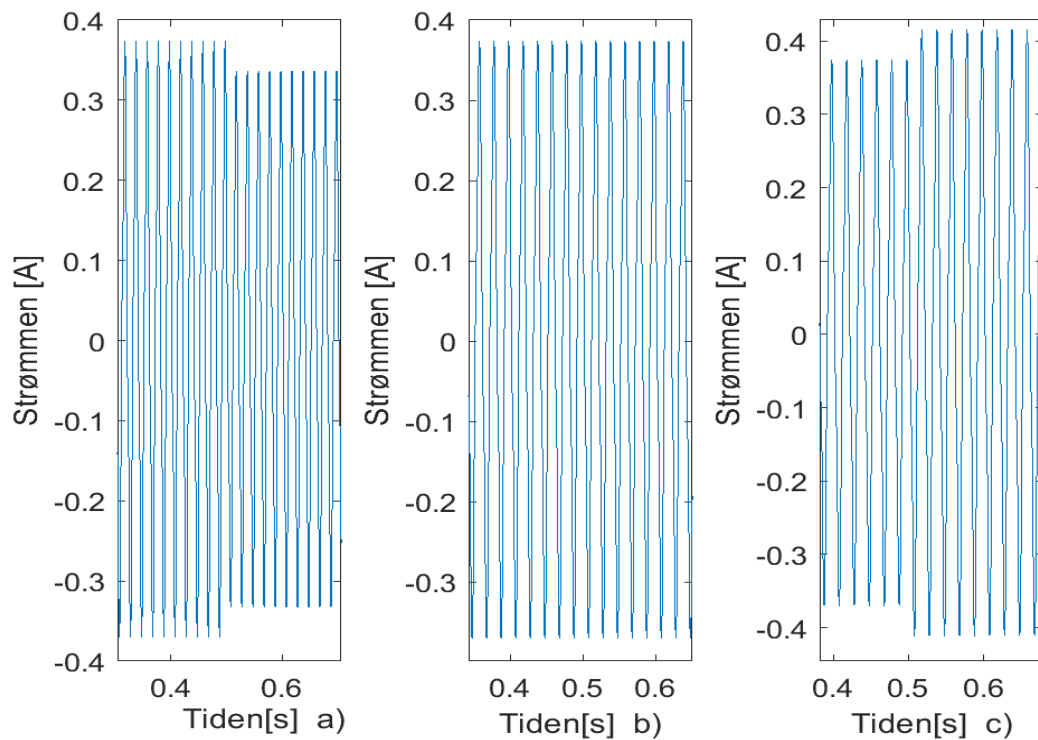


Figur 5-2 Simulerte avvik relativ til strømmens rms ved ulike spenningsnivå.

Figur 5-2 viser de simulerte resultatene. Videre kan man konkludere med at strømkurven er skalert proporsjonalt med spenningen. Dermed er det lite avvik ved denne metoden. Det man videre kan se fra illustrasjonen, er at kumulative feil i forhold til overharmoniske rms verdi blir redusert med spenningen, som betyr at feilen blir ikke så mye større ved spenningsvariasjon. Når spenningen øker blir kurven større, feilene utgjør dermed mindre for det totale utslaget. Mens det kvadratiske avviket er konstant ved all spenningen mellom $\pm 30\%$ av nominell spenning.

5.4 Verifikasjon av ZIP modellens kompensering ved spenningsvariasjon

For å verifisere ZIP-modellens virkning mot spenningsvariasjon inn på modellene i Simulink, ble det satt inn en «Step» blokk på spenningsinngangen. Denne gir en spenning på 230V fram til 0.5 sekund og deretter trinnes ned til 207V etter 0.5 sekund. Modellens utgang er strømmens-kurveform, RMS-verdi eller fasevinkel, derfor er det relevant å sjekke spenningsvariasjon hensyn på strømmen. I Figur 5-3 a) er det konstant impedans, b) er det konstant strøm og ved c) er det konstant effekt. Det er en vifte på 36W, motordominerende last, som denne ZIP-modellen er verifisert på i Figur 5-3.



Figur 5-3 Verifikasjon av respons på strømmens ZIP-modellen ved endring i spenning fra 230V til 207V, a) viser for konstant impedans, b) viser konstant strøm, c) er konstant effekt.

Som Figur 5-3 viser, stemmer disse strømindringene med ZIP-modellens egenskaper. Ved å implementere ZIP-modellen uttrykt via strømmen fra med en rullegardinfunksjon i dialogvinduet til sub-systemet(modellen) kompenseres det for spenningsvariasjon.

6 Felles rammeverk for simulering

De tidligere kravene som fremkommer fra kapittel 4 og betraktningene i kapittel 5, er videre bearbeidet for bygging av et felles rammeverk i Simulink. Det er utviklet to modeller for impedanslast, som er kompatible mot de fleste typer impedansbelastninger. I tillegg er det bygget to felles generelle modeller for alle andre typer belastninger. Denne baserer seg på innhenting av koeffisienter i .mat fil og m filer til workspace, beskrevet i kapittel 7.2.

6.1 Matematisk beskrivelse av modellene

I formel (6.1) ser man et uttrykk for strømmen, $i(t)$, i form av en Fourier-rekke.

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sin(h\omega_1 t + \theta_m) \quad (6.1)$$

, der I_{dc} er likestrømsleddet, I_m er toppamplituden til hver orden m , ω_1 er en grunnharmonisk frekvens i rad per sekund, og θ_h er overharmonisk fasevinkel.

Hvis man omformer likning (6.1) til cosinus form:

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos(h\omega_1 t + \theta_m - 90^\circ) \quad (6.2)$$

Med en slik rekke vil periodetiden for bølgeformen være:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi}{2\pi f_1} = \frac{1}{f_1} \quad (6.3)$$

Kravene til rammeverkets ulike modeller er beskrevet i kapittel 6.7. Når funksjonen $i(t)$ er periodisk med en identifiserbar periode T , kan det skrives om på rektangulær form:

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t)], \quad \omega_1 = \frac{2\pi}{T},$$

hvor

$$I_{avg} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt, \quad (6.4)$$
$$a_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \cos(k\omega_1 t) dt,$$
$$b_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \sin(k\omega_1 t) dt.$$

Den formelen (6.4) er brukt som grunnlag for modellene i generelle -og impedanslaster for å konstruere kurveformene for strømmen.

For hurtigere simuleringer er det bygget en mindre komplisert måte å fremvise modellens verdier. For den generelle, vist i formel (6.5) rms-verdier for fourier-rekken komponenters:

$$F = \left(F_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.5)$$

Gjennom strømmens rms-verdier basert på innhentede koeffisienter fra Fourier-rekken komponenters rms-verdier vist i (6.6):

$$I_{\text{RMS}} = I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_{20}^2 \quad (6.6)$$

Formel (6.6) er benyttet i modellen i Simulink for hurtigere simuleringer. Denne være dynamisk fra den grunnharmoniske strømkomponenten til 20 overharmoniske, avhenger av hvor i prosessen simuleringen er kommet.

Formlene som er benyttet for å kalkulere strømmens fasevinkel er «The Displacement power factor», som er den samme for effekt faktoren i lineære kretser som ulineære og derfor definert med cosinus med vinkel ϕ_1 [22]:

$$\text{DPF} = \cos \phi_1 \quad (6.7)$$

Hvor fasevinkel/effekt faktor til ulineære strømmer er:

$$\text{PF} = \frac{I_{s1}}{I_s} \text{DPF} \quad (6.8)$$

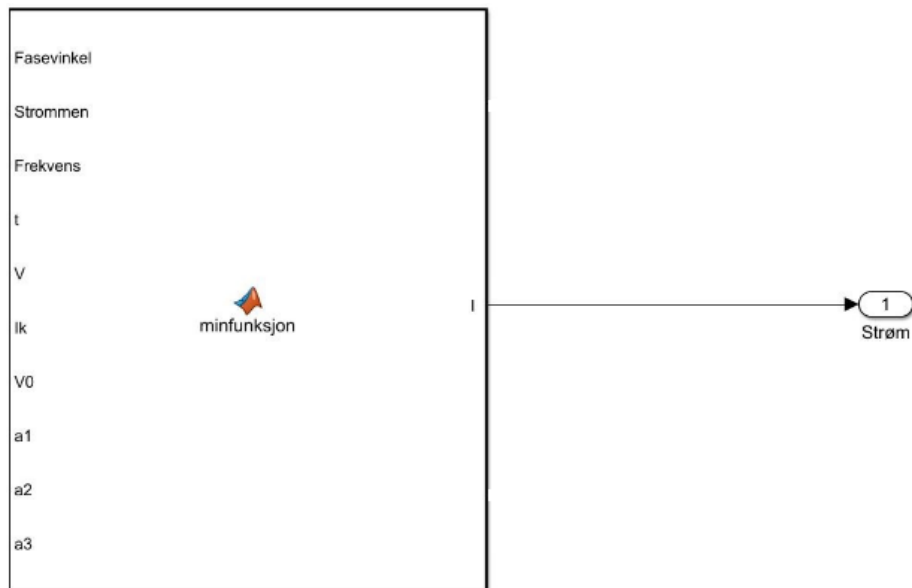
6.2 Introduksjon til de konstruerte modellene

For modellene av husholdningapparater i Simulink er det laget fire modeller, med ulik oppløsning og simuleringstid. Det er flere likehetstekk med disse modellene, for den generelle lastmodellen som er beskrevet i kapittel 6.3 og for impedanslastmodellen forklart i kapittel 6.4 er bygget opp som vist i punktlisten:

- Generell lastmodell der strømkurve er utgang.
- Generell lastmodell med strømmens rms-verdi og strømmens fasevinkel som utgang.
- Impedanslastmodell der strømkurve er utgang.
- Impedanslastmodell med strømmens rms-verdi og strømmens fasevinkel som utgang.



Figur 6-1 Modell ramme for generell-og impedans lastmodell, utgang rms-verdi og fasevinkelen.



Figur 6-2 Modell ramme for generell-og impedans lastmodell, utgang strømcurve.

6.3 Den generelle last modellen

Denne modellen er basert på innhenting av koeffisienter som er etablert i en tabell for .m-fil etablert i Workspace. Dette er form for ett bibliotek for koeffisientene til modellene, hvor man velger fra biblioteket i dialogvinduet til modellen. For å modellere flere typer husholdningsapparater slik at man legger til flere av typer apparater, velges denne modellen på nytt og man velger i biblioteket via dialogvinduet etter ønsket husholdningsapparat som skal simuleres.

6.3.1 Oppsett på lagring og innhenting av utstyrs koeffisienter

I dette kapittelet skal det beskrives lagring av koeffisienter til utstyrsspesifikke vektorer og skalerer for å kunne gjennomføre simuleringer i Simulink. Det vil også bli presentert en forklaring av hvordan koeffisienter fra oscilloskopet via fft-analyse kan brukes til å modellere en husholdning. Det er tre typer modeller for hver type utstyr i koeffisientene;

- Strøm
- Fasevinkel
- Frekvens

For å etablere et generelt rammeverk med enkelt oppsett, utviding muligheter i modellen og god brukervennlighet av modellene er det valgt lagring av verdier i tabellform i .m-filer som lagres til en mat-fil. Fordelene er flere, de er kompatibel mot .csv til for eksempel oscilloskop eller til ekstern lagring i .xlsx fil i Microsoft Excel. Når man skal modellere nye typer husholdningsapparater er det enkelt beskrevet i 7.2, som gjør modellene fleksibel i forhold til videre utvidelse.

Definert som tabell i Matlab som benytter de tre første kolonnene for sortering på hvilke typer som skal modelleres; strøm, fasevinkel og frekvens. Tabell 6-1 viser hvordan den første inndelingen er satt opp. Raden nummer 1 skiller seg ut fra andre, siden det er lys i alle rom i boligen.

Tabell 6-1 Kategori for rominndeling.

Rom type	Nummer i kategori
<i>Lys generell for alle rom</i>	1
<i>Kjøkken</i>	2
<i>Bad</i>	3
<i>Stue</i>	4
<i>Uteområde</i>	5
<i>Soverom</i>	6
<i>Hall/Gang</i>	7
<i>Entrè</i>	8
<i>Bod</i>	9
<i>Vaskerom</i>	10
<i>Teknisk</i>	11
<i>Garasje</i>	12

Ved disse kategoriene er det satt opp relevant husholdningsutstyr som er egnet for dette rommet, for å velge andre utstyr, velges i rullegardinfunksjon i dialogvinduet på modellen. Ved å dele inn husholdningen etter rominndeling, er det en mer effektiv måte å få inn de utstyrene som ønskes å simuleres i Simulink. I tillegg er husholdninger generelle med tanke på hva som eksisterer av elektriske utstyr på hvert enkelt rom. Et kjøkken inneholder stort sett oppvaskmaskin, kjøleskap, stekeovn, komfyr, kaffetrakter og mikrobølgeovn. Ved denne rominndeling gjøres prosessen mer effektiv og relativ i forhold til husholdningsapparatene som skal modelleres. Videre er Tabell 6-2 inndelt etter verdier i kolonner og slik sorteres hvilke typer utstyr som skal modelleres. Kolonnene er delt inn etter følgende:

- Kategori: romtype
- Utstyrets navn identifikasjon
- Radens identifikasjon, data rad

Tabell 6-2 Oppsett for innhenting av koefisienter fra mat fil.

Kategori: Romtype	NavnID på utstyr	Data rad
1	LED SG Downlight 7W	1
1	LED SG Armatur 15W	2
1	LED SG Driver 10W	3
1	Unilamp Philips Case 2x6W	4
2	Unilamp Philips Speilarmatur 7W	25
2	Komfyr Elctrolux EKI6051E0W	26
2	Induksjonskomfyr AEG 63476IU	27
2	Oppvaskmaskin Miele G 4930	28
3	Vaskemaskin Miele WDB020	32
3	Hårføner Philips HP8230	33
3	Barbermaskin S5310	34
3	Tørketrommel Electrolux E8H648G7	35
.....
....

I fra denne listen velges utstyr, der referer Data rad kolonnen til en annen tabell hvor verdiene fra tidligere fft-analysen ligger. Det er inndelt i tabellen slik at for 20 overharmoniske frekvenskomponenter tas med. Det vil si at strømvektoren er fra 1-21 første radene, fasevinkelen er 22-43 og frekvensen er fra 43-64 som vist i Tabell 6-3.

Tabell 6-3 Oppsett kolonne vektorer (double).

Oppsett for plassering av vektorer 1x64 (double)

Strøm		Fasevinkel		Frekvens	
21 kolonner		21 kolonner		21 kolonner	
1	21	22	43	44	64

Disse verdiene blir automatisk lagt til i tabell for nye målinger, som beskrevet i kapittel 7.2. Med et slikt oppsett kan disse målingene bli praktisk utført når man vil eller når man har muligheten. Komplette tabelloppsett og modell ligger i vedlegg A. Det er laget et oppsett og rammeverk for hvordan verdier for alle typer utstyr skal gjøres og testet at systemet fungerer i Simulink. I Figur 6-3 er det vist hvordan systemets virkemåte fungerer mot vektorer fra hentet via scriptet og lagret plassering. Dette er egnet for spesifikke utstyr, der rammeverket er tilfredsstillende.



Figur 6-3 Logisk kobling mellom tabeller i Simulink.

Sorteringen for rominndeling er gjenstår i dialogvinduet. Grunnen for at dette er blitt utsatt, er for å kunne løse andre oppgaver i modellen og er satt opp til anbefalt videre arbeid.

6.3.2 Modellens struktur

6.3.3 Fcn Matlab function (minfunksjon)

Modellene er alle basert på samme grunnmodell: «fcn Matlab function» blokk som illustrert i Figur 6-4. Kort forklart er dette en bruker-definert funksjon som programmører etter ønsker i henhold til innganger, utganger og dialogvinduet settingsparametere.



Figur 6-4 Fcn Matlab function.

I Figur 6-4 er nummer 1-6 definert som innganger til modellen, og valgt beskrevet nedenfor. Videre er inngangsnummer 7-10 definert som parameter i subsystemet og velges i dialogvinduet på modellen. Nummer 11-13 er utganger og beskrevet i neste delkapittel. I Tabell 6-4 er beskrivelse av inngangens funksjoner og innhold i «fcn Matlab function»-modellen.

Tabell 6-4 Beskrivelse av innganger i Figur 6-4.

Innganger i Figur 6-4.	Beskrivelse av inngangers funksjoner og innhold	Data type
-------------------------------	--	------------------

1.	Fasevinkel-vektor med koefisienter fra FFT analyse	Vektor [1x21] (double)
2.	Stømmens amplitude-vektor med koefisienter fra FFT analyse	Vektor [1x21] (double)
3.	Frekvensens-vektor med koefisienter fra FFT analyse	Vektor [1x21] (double)
4.	Simuleringstiden, kan brukes til å faseforskyve strømkurven	Vektor (skalar)

5.	Spenningen fra tilkoblet nett. Skal har RMS blokk tilkoblet før inngangspenningen.	Skalar (double)
6.	$I_{kontroll}$ kan regulere nivået til lasten.	Vektor (skalar)
7.	Nominell spenning til utstyrets ytelse og merkeskilt	Skalar (double)
8.	Parameter a_1 fra ZIP modell, bestemmes i dialogvindu	Skalar (double)
9.	Parameter a_2 fra ZIP modell, bestemmes i dialogvindu	Skalar (double)
10.	Parameter a_3 fra ZIP modell, bestemmes i dialogvindu	Skalar (double)

6.3.4 Utdypende beskrivelse av innganger(input)

Inngang #5: Spenning inn til modellen er bygget for å være tiltenkt levert fra nettleverandør, der verifisert spenningsvariasjon kan være mellom $\pm 30\%$ av nominell spenning. Denne må spesifiseres med rms-blokk for å tilfredsstille kravene til Simulink. Det er verdt å nevne seg at spenningen tilkoblet et distribusjonsnett i Norge, som stort sett alle husholdninger er, kan variere $\pm 10\%$ i henhold til [27] forskriften om leveringspålitelighet.

Inngang #6: $I_{kontroll}$ er konstruert for å kontrollere modellen etter ulike nivåer, av, på og lignende. Se kapittel 6.5 for mer utdypende beskrivelse av $I_{kontroll}$. Her kan blokker settes for å justere utgangsverdien på modellen, blokker i simulink kan være:

- Source: Step blokk
- Source: Constant blokk
- Signal builder blokk
- Senario blokk
- Etc.

Denne inngangen er opprettet for å tilpasse modellen etter brukerens ønske og formål for simuleringen.

Inngang #4: Er utgangspunktet for simuleringstiden. Denne er koblet til ωt i fourierrekken og bestemmer tiden for simuleringen av rekken.

6.3.5 Utdypende beskrivelse av utganger(output)

Utgangers forhold og beskrivelse i henhold til Figur 6-4 er nevnt nedenfor.

Utgang#11: Strømmens kurveform er egnet for simuleringer for kortere simuleringstider. For eksempel godt egnet for noen perioder eller så lenge man måtte ønske, men best tilpasset kortere perioder. For å måle strømkurven tilkobles Scope på utgangen. Fra denne utgangen vil strømkurven være relativt identisk til den kurveformen som skal husholdningapparatet generer til nettverket. For videre analyse av aktiv effekt, reaktiv effekt og THD er denne godt egnet, det er verifisert i kapittel 7.

Utgang #12: Strømmens rms-verdi er en beregnet skalar og best egnet for lengre simuleringer. Den er dynamisk og endres underveis i simuleringen, der dette i motsetning til strømmens kurveform er en enkelt verdi. Denne metoden er en rask simuleringsmodell, og egnet for eksempel for lengder på en eller to uker.

Utgang #13: Strømmens fasevinkel er en skalar som også brukes for lengre simuleringer. Denne er også dynamisk og endres underveis i simuleringen. Denne utgangen blir kombinert med utgang #2, slik modellene er bygget opp.

En av formlene som er benyttet for å beregne strømmens fasevinkel er The Displacement power factor, og den samme for effekt faktoren i lineære kretser som ulineære og derfor definert med cosine med vinkel ϕ_1 [22]:

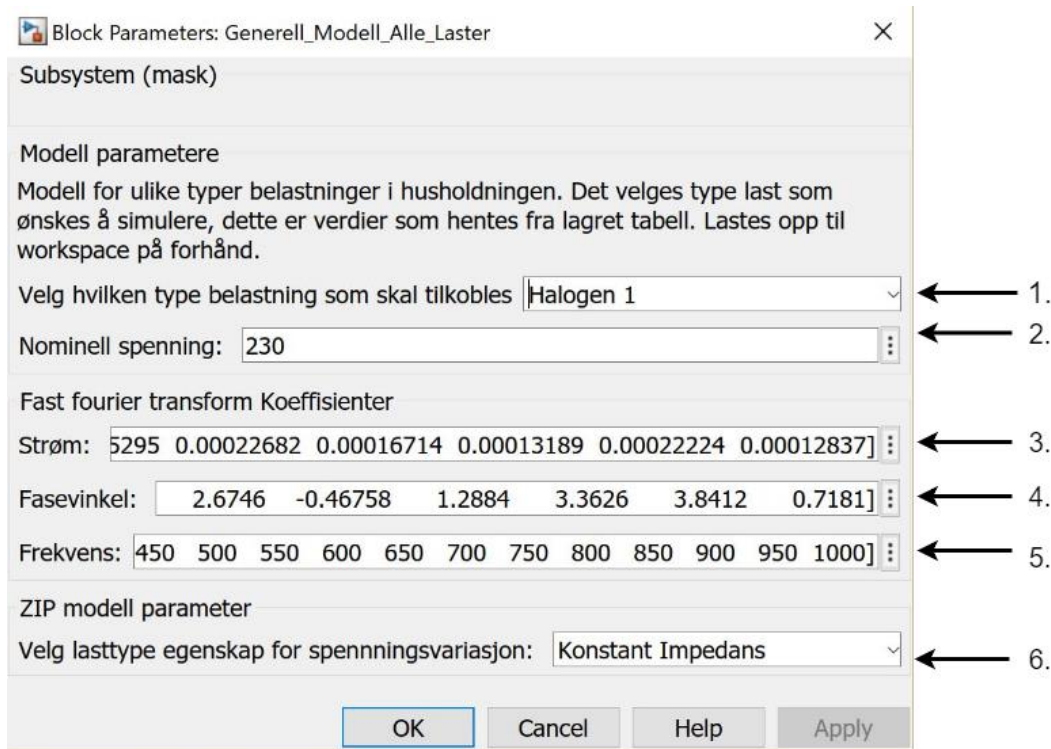
$$\text{DPF} = \cos \phi_1 \quad (6.9)$$

Hvor fasevinkel/effekt faktor til ulineære strømmer er:

$$\text{PF} = \frac{I_{s1}}{I_s} \text{DPF} \quad (6.10)$$

6.3.6 Dialogvindu valg

I dialogvindu blir vektorer hentet fra oppsettet i kapittel 6.3.1, her velges hvilken type belastning modellen skal ha. Den type last som ønskes å simuleres velges, deretter tar modellen høyde for korrigeringer i spenningsvariasjon via ZIP-metoden.



Figur 6-5 Subsystem(mask)/dialogvindu for den generelle lastmodellen.

Punkt #1: I dialogvindu blir vektorer med koeffisienter hentet ut ved å velge hvilken type belastning modellen skal ha.

Punkt #2: Skriv inn nominell spenning til forbrukerutstyret som skal modelleres, oftest for husholdningsapparater er dette enten 230V eller 220V.

Punkt #3: Strømmens amplitude koeffisienter fra fft-analyse visualisert. Dette er en vektor på 21 rader og en kolonne[1x21] for 20 antall overharmoniske fra den grunnharmoniske komponenten.

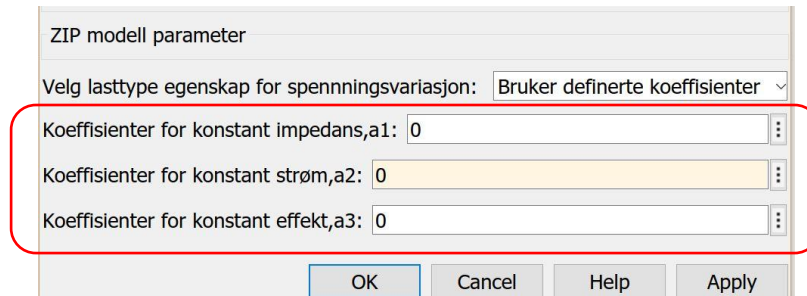
Punkt #4: Fasevinkelens koeffisienter fra fft-analyse visualisert. Dette er en vektor på 21 rader og en kolonne[1x21] for 20 antall overharmoniske fra den grunnharmoniske komponenten.

Punkt #5: Frekvensens gitt i Hz, visualisert. Dette er en vektor på 21 rader og en kolonne[1x21] for 20 antall overharmoniske fra den grunnharmoniske komponenten.

Punkt #6: I dette valget har man fire valg, vist i punktlisten:

- Konstant impedans
- Konstant strøm
- Konstant effekt
- Brukerdefinerte koeffisienter

Denne modellen er basert på formlene i kapittel 5.2.2, ZIP-modellen. Ved valg av de tre første punktene i Simulink dialogvindu, vil den gjøre endringer skjult i modellen. Men når brukerdefinerte koeffisienter velges, kommer det opp tre synlige vektorer, der man som bruker kan skrive inn egne verdier for koeffisienter. Illustrert i Figur 6-6:



Figur 6-6 Popup edit felt i dialogvindu for ZIP koeffisienter.

Innenfor rammen i Figur 6-6 kan man skrive inn selvdefinerte koeffisienter for ZIP-modellen. Dette gjør at brukeren selv kan påvirke resultatet til lastendring.

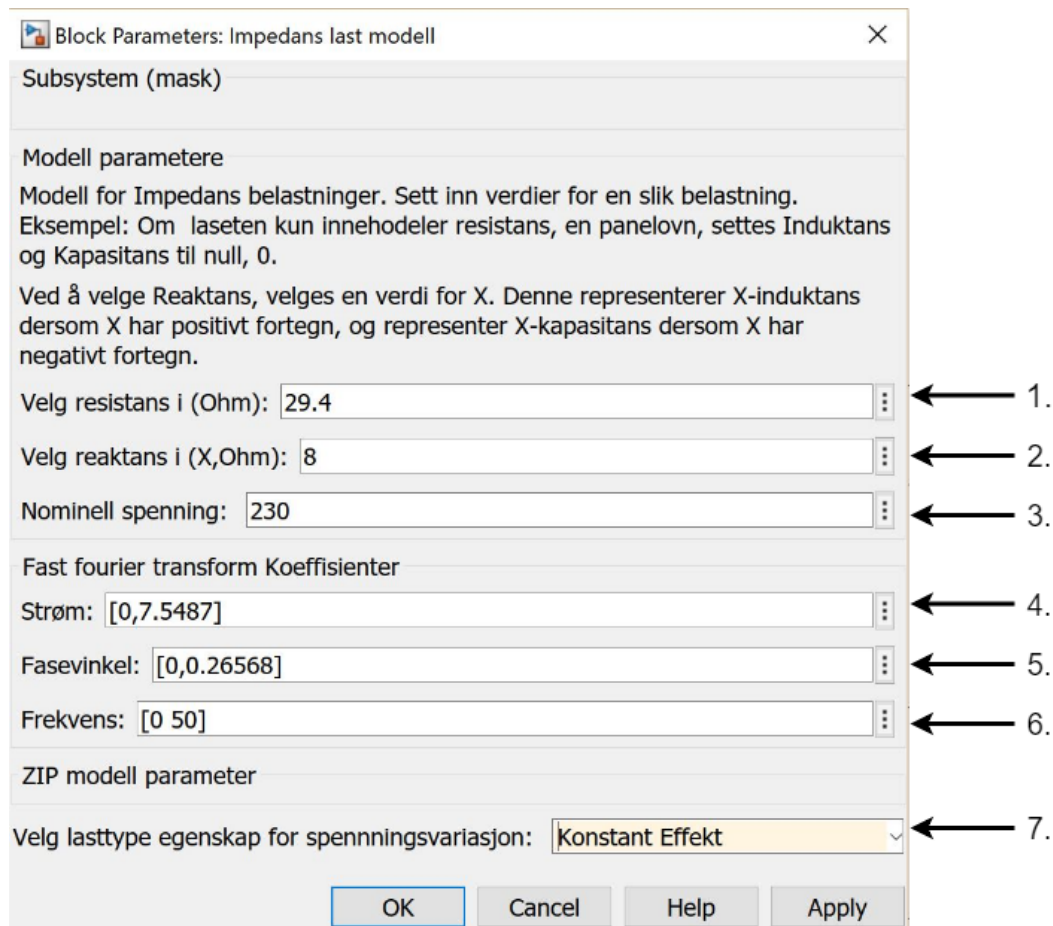
6.4 Impedans last modell

En lastmodell for impedansbelastninger er konstruert i Simulink. Denne belastningstypen skiller seg fra de andre belastningene definert i kapittel 3, hvor den generelle lastmodellen skal dekke alle andre belastningene i kapittel 3. Oppbygningen av denne modellen har mye lik struktur som den generelle lastmodellen. På grunn av dette blir det kun beskrevet forskjellene ifra den generelle lastmodellen i dette kapittelet.

6.4.1 Modellens struktur

6.4.2 Dialogvindu

Den er konstruert modeller for enkel bruk i subsystem via dialogvinduet «mask editor». Denne henter ikke inn koeffisienter fra tidligere simuleringer eller målinger, men genererer verdiene i dialogvinduet til strømmen, fasevinkelen til strømmen og frekvensen. Alle disse beregningene som blir utført er skjult i dialogvinduet og relevante vektorer illustreres i vektorvinduet i dialogvinduet.



Figur 6-7 Subsystem(mask)/dialogvindu for impedanslastmodell.

Punkt #1: I dette feltet skal man fylle inn utstyrets resistans(R) i antall Ohm(Ω). Ved å spesifisere utstyrets resistans vil modellen automatisk gjennomføre beregningene.

Punkt #2: Her fylle inn utstyrets reaktans(X) i antall Ohm(Ω). Hvis reaktansen er negativ er den representativ av en kapasitiv krets. Er reaktansen positiv er kretsen induktiv.

Punkt #3: Skriv inn nominell spenning til forbrukerutstyret som skal modelleres, oftest for husholdningsapparater er dette enten 230V eller 220V.

Punkt #4-6: Disse punktene har lik funksjonalitet som den generelle lastmodellen, men her er det kun den grunnharmoniske frekvensen som er aktuell å ta med for koeffisientene. Ved å velge resistansen, reaktansen og spenningen på belastningen man har, vises strøm, fasevinkel og frekvens i punkt #4-6. Disse verdiene brukes videre i kjernemodellen for å generere kurveformen for kortere simulering og strømmens rms og fase for lengre simuleringer.

Punkt #7: Er identisk som i punkt #6 for generell lastmodell.

6.5 Bruken av I_{kontroll} for regulering av modellenes nivå

Signalinngang til styring av belastninger kan reguleres på forskjellige måter. Denne funksjonen I_k er lagt inn for å regulere og kontrollere modellens verdier.

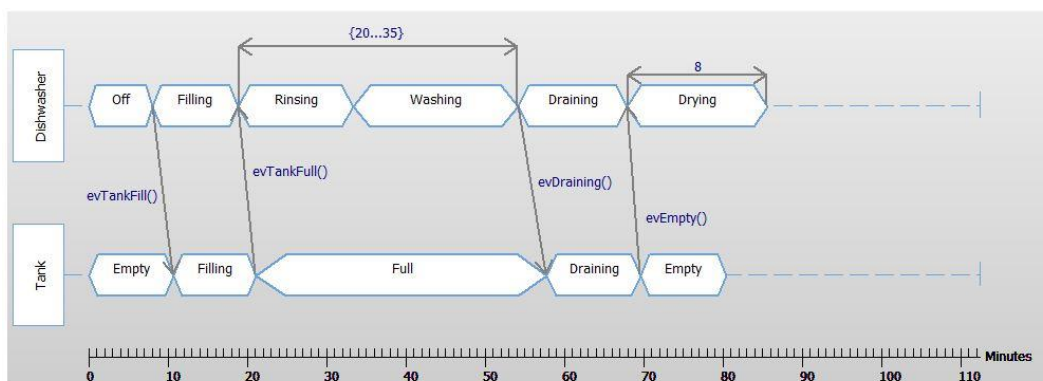
Et eksempel på bruk av dette I_k er at man ønsker å modellere en komfyr, ved at verdiene ligger inne i modellen. Om man vil kunne kompensere for de ulike effektnivåene på komfyren ved å sett I_k til for eksempel 0,2, når bryteren står på trinn 1 og fortløpende lik logikk for de andre 3 bryterne på komfyren. Alle strømverdier ut av modellen avhenger av hvilken verdi I_k settes til. Hvis den settes til 0, vil ingen verdi ut av modellen bli konstruert. Som beskrevet i formel (6.11). Også for kurveformer der amplituden endres underveis, kan man ha flere blokker med ulik I_k , for å kunne få designet regulering av flere sammensatte modeller. Dette vil bli videre utdypet i neste kapittel.

$$I_{\text{out}} = I_{\text{resultat}} \cdot I_k \quad (6.11)$$

Dette betyr at for I_k : 1 = PÅ, 0 =AV, 0.5 =50% og prosentvis av strømmen om dette ønskes.

6.6 Modellering av utstyr med ulike sekvenser

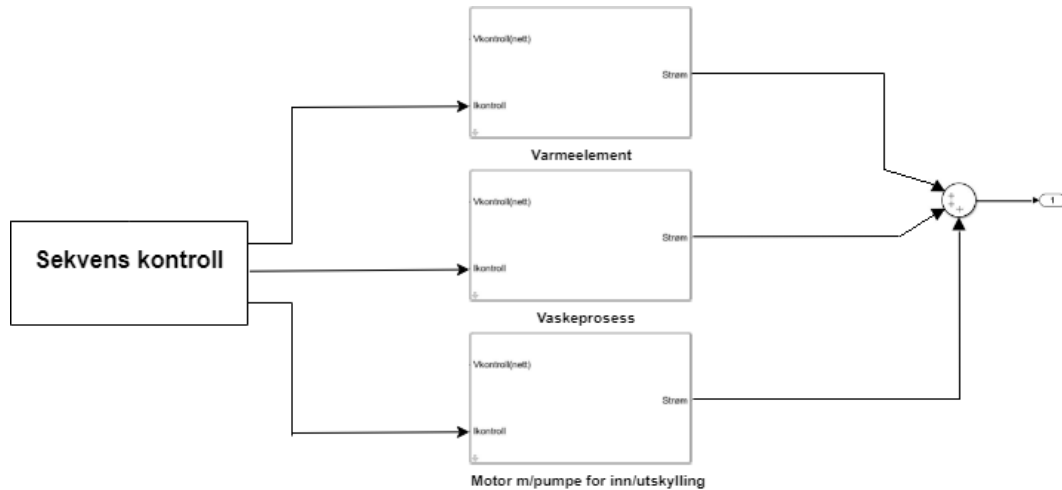
I dette kapitlet skal det forklares løsning for modellering av husholdningsapparater som har endringer av kurveform underveis i driftssyklusen. Husholdningsapparater som har ulike sekvenser, for eksempel så endrer en oppvaskmaskin. De har syklusen ved at den først fyller opp vann i tanken som varmes via varmeelement, skyller via vaske prosessen og til slutt skyller den ut vannet og når prosessen er ferdig. Et eksempel på sekvensskjema for oppvaskmaskin er vist i Figur 6-8, som viser denne prosessen.



Figur 6-8 Sekvensskjema for en oppvaskmaskin[30].

En konstruksjon av hver enkelt sekvens må hentes inn via prosedyren som er beskrevet i kapittel 7.2, for å sette de sammen (som beskrevet i kapittel 6.3). For en løsning på disse utstyrene er det laget et blokkdiagram for å illustrere dette. Denne metoden kan benyttes på flere typer modeller som har forskjellig sekvens i prosessen. Slik som Figur 6-9 fremviser det, er det flere modeller hvor første blokk representerer varmelementet i oppvaskmaskinen, som varmer vanntanken. Modell 2 er vaskeprosessen til skylling

internt i maskinen og selve vaskingen. Modell 3 er motor med tilknyttet pumpe for inn og utskylling av vann til oppvaskmaskinen. Alle disse sekvensene styres av sekvenskontroll, der for eksempel varmeelementet kan slås av og på flere ganger under hele oppvaskprosessen, kontrollert av sekvenskontroll.



Figur 6-9 Blokkdiagram for modeller med sekvens kontroll.

Sekvenskontroll må tilpasses hvert enkelt utstyr når det skal modelleres i Simulink. Det er derfor ikke ferdig utviklet siden denne avhandlingen har til hensikt å etablere et rammeverk for simuleringer. Dette sees derfor som fremtidig arbeid.

6.7 Simulering og krav

6.7.1 Ønsket oppnåelse med simuleringen og over ulike tidperiodsperioder

Ønsket oppnåelse med simuleringene i denne oppgaven er primært å verifisere at rammeverket fungerer slik problemstillingen tilsier. Ved å verifisere de konstruerte modellene over noen perioder sjekker man at parameterestimeringsmodellene er relativt like. I tillegg er det generelt for å utføre simuleringer av husholdningsapparater, hvor det er ønsket å se på primært to ulike tidsrom:

- Simulering over kortere tidsperiode, noen perioder tidsskala.
- Simulering over ett døgn eller en uke.

For de kortere periodene kan man enklere evaluere den karakteristiske oppførsel til alle utstyr, strømkurvene, spenningskurvene og den beregnede THDi/THDv. Mens for lengre simuleringer til for eksempel en uke, er det aktuelt å se på effektene som husholdningsapparatene forbruker til ulike tidspunktene i både TN-og IT nett.

Ved simuleringer av husholdningsapparater er modellene tilrettelagt for simuleringer for begge disse to variantene. Benyttes generell-og impedans lastmodell med rms og fasevinkel som utgang er denne kompatibel med simuleringer over ett døgn og en uke.

Mens benyttes generell-og impedans lastmodell med strømmens kurveform som utgang er denne godt egnet for simuleringer over mange perioder.

6.7.2 Simuleringens sampligens tidssteg T_{S1} for generell lastmodellene

En vurdering for hvilket tidssteg som er egnet for simuleringene er utført og vist i formel (6.12) (6.13) og (6.14):

$$T_{S1} = \frac{1}{F[\text{hz}]} \quad (6.12)$$

Fra kapittel 4.5 er det oppsummert og konkludert med 20 overharmoniske av den grunnharmoniske på 50 Hz. Dette betyr at 1000 Hz er utgangspunktet for simuleringen, der simuleringens tidssteg er en faktor på 10 i forhold til ordinære samplingstid [31]:

$$T_{S1} = \frac{1}{1\text{khz}} = 1\text{ms} \quad (6.13)$$

$$T_{\text{sgenerell}} = \frac{T_{S1}}{10} = \underline{\underline{0.1\text{ms}}} \quad (6.14)$$

For generell lastmodellene er kravet 0.1 millisekunder for samplingtidens tidssteget i Simulink. Under diagnostics i Simulink benyttes en «fixed-step solver option» for faste punkter mellom hver sampling.

6.7.3 Simuleringens sampligens tidssteg T_{S2} for impedans lastmodellene

En vurdering for hvilket tidssteg som er egnet for simuleringene er utført og vist i formel (6.15) (6.16) og (6.17):

$$T_{S2} = \frac{1}{F[\text{hz}]} \quad (6.15)$$

Fra kapittel 4.5 er det oppsummert og konkludert med den grunnharmoniske på 50 Hz for impedanslaster. Det valgt å ta utgangspunkt i 50 Hz, hvor simuleringens tidssteg er en faktor på 10 i forhold til ordinære samplingstid [31]:

$$T_{S2} = \frac{1}{50\text{hz}} = 20\text{ms} \quad (6.16)$$

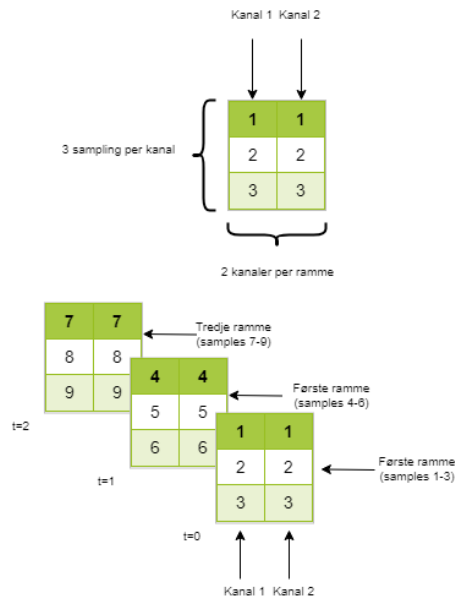
$$T_{S\text{Impedans}} = \frac{T_{S2}}{10} = \underline{\underline{2\text{ms}}} \quad (6.17)$$

For impedanslastmodellene er kravet 2 millisekunder for sampligstidens tidssteg i Simulink, hvor man benytter «fixed-step solver option» for faste punkter mellom hver sampling.

6.7.4 Frame- and sample-based processing

6.7.4.1 «Frame based processing»

I en «frame-based processing», kjører blokkene prosesserer en dataramme om gangen. Dette betyr at hver dataramme, inneholder sekvensiell informasjon uavhengig av hvilken kanal. Hver kanal er representert av en kolonne av inngangssignalet som illustrert i Figur 6-10.

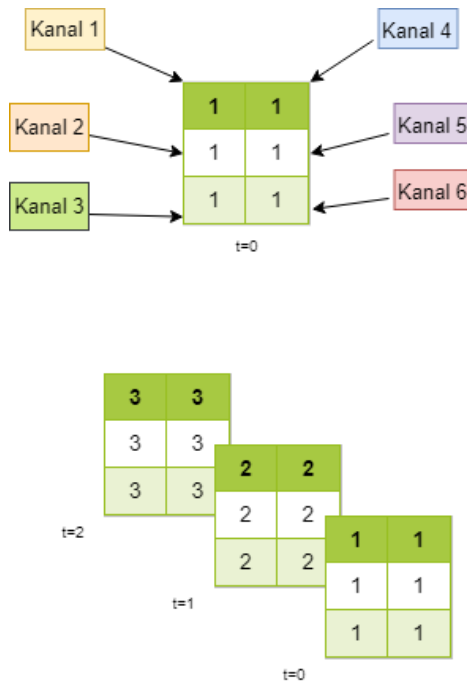


Figur 6-10 Frame-based processing.

Fordelen med «Frame based processing» er at det er raskere sanntid simuleringer, og er et vanlig format for sanntidsystemer. I tillegg er simulering hurtigere enn «sample-based processeing».

6.7.4.2 «Sample-based processeing»

I en «Sample-based processing» kjøres blokksignalene en «sample» om gangen. Det betyr at for hvert inngangselements signal, representerer en «sample» i en gitt kanal, som illustrer på Figur 6-11. Hvis for eksempel en «sample-based processing» matrise på 3x2 størrelse, vil matrisen inneholde den første «sample» i hver kanal, der alle disse kanalene er helt uavhengige av hverandre.

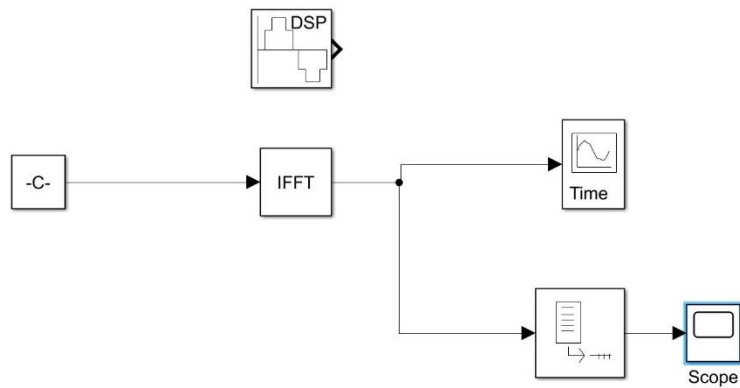


Figur 6-11 Sample-based processing.

Ved en slik konfigurasjon tolker Simulink det slik at en kanal er en verdi, og har man en matrise på 3x2, tolker den det som seks uavhengige signaler. «Sample-based» er derfor mer tidkrevende simuleringstid enn «frame-based processing». En fordel er at konfigurasjonen er kompatibel mot kontinuerte tidssignaler.

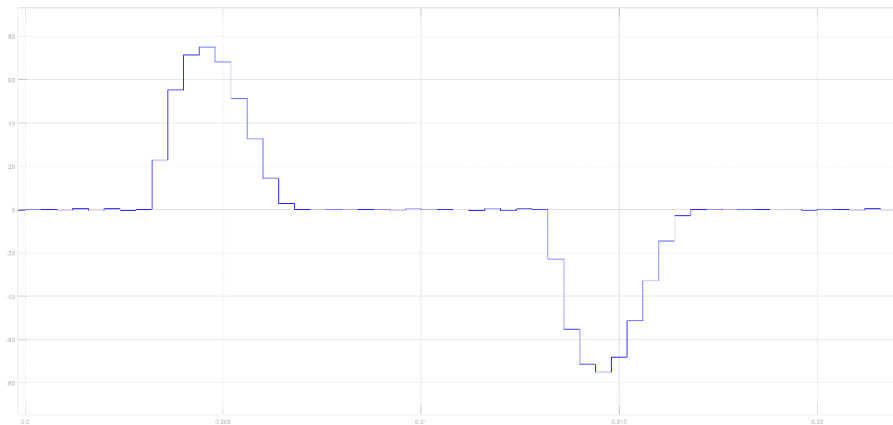
6.7.4.3 Sammenligning av frame-based and sample-based processing

På grunnlag av at rammebasert modellering har flere fordeler som nevnt i kapittel 6.7.4.1, ble denne testet ut mer i detalj. I Figur 6-12 er modellen som er testet ut. Det ble forsøkt å rekonstruere strømkurven til en simulert enfaset diodelikerettermodell i Simulink. Resultatene fra simuleringen (fft av stømmen) er satt inn i konstantblokken for å så gjenskape dens kurveform i scopet.



Figur 6-12 Frame based IFFT i Simulink.

Fra simulering tas det med frekvenskomponenter opp til 1000Hz for den rekonstruert strømkurven igjennom IFFT-blokken i Simulink. Det ble testet med frekvens opptil 2000Hz og ned til grunnfrekvensen 50Hz i Simulink modellen, men ingen av disse testene påvirket utslaget på den trinnformede kurveformen i Figur 6-13.



Figur 6-13 Simuleringsresultat for en periode ved framed based IFFT.

Observasjon gjennom modelleringen og simuleringen er at resultatet med denne metoden ikke er tilstrekkelig på grunn av at det noe feil med oppløsningen fra framebased til samplebased, trolig på grunn av at unbuffer-blokken utgir et trappet signal, med fast tid mellom hvert punkt. I tillegg ble det observert flere ulemper med metoden. Den førstnevnte er at metoden ikke fungerer korresponderende med klokkeinnstillingen for kontinuerlig signal. Andre ulemper er at den støtter kun discrete signaler og ikke «continuous time signal» til innganger eller utganger. Utfallet av dette er at det ikke vil fungere tilfredsstillende med flere større systemer og flere sammenkoblede modeller, for eksempel når man skal sette mange utstyr tilkoblet ett IT- eller TN-nett.

6.8 Forklaring til ulike typer styring for simulering

6.8.1 Modell kompatibel for eksternt inngangssignal

Modellen er kompatibel for at den kan styres med egen eksternt kontrollinngang for brukeren, ved å koble signaler eller blokker etter brukerens ønske, kan det tilkobles på inngangen I_{kontroll} som beskrevet i kapittel 6.5. Ved å benytte denne kan man sette utstyr til 0 og utstyret er av, settet til 1, er utstyret på eller i tillegg kan de settes til ulike effektnivå.

6.8.2 Videre utvikling av kontroll inngangssignal

I Simulink utgitt av Matlab@2017b finnes «Scenario Signal Editor»-blokk som er godt anvendbar for styring av hvilket utstyr som skal være på eller av til en hver tid. I denne Simulink-blokken kan man sette opp enkeltsignaler, flere signaler sammen og Bus-signaler. Ved å benytte denne blokken kan man sette opp flere ønskede scenarioer for de ulike utstyrene. Fordelen med denne blokken er at den er en nyutviklet blokk fra Simulink og gir gode mulighet for regulering og baserer seg på scenariooppbygging.

6.8.3 Tilleggsfunksjoner; av, på eller andre funksjoner til ulike utstyrene

I Tabell 6-5 viser oversikt over tilleggsfunksjoner som kan benyttes. Denne er mest egnet for brukeren av modellene, som illustrerer tilstanden og styringen til hvert enkelt utstyr. Ved siste kolonnen i Tabell 6-5, nevnes brukerstyrte styringer hvor det er ment utstyret som ikke er regulert av elektrisk krets eller reguleringsløyfe, men er operert av forbrukeren i husholdningen. Disse utstyrene har en viss usikkerhet ved forutsigbarhet og ved bruk av modellene må dette tas hensyn til dette når utstyrene skal settes sammen med flere apparater.

Ved automatisert i denne sammenheng, er det ment apparater som er tilkoblet det elektriske kraftsystemet til boligen, og apparatet har en fast syklus når apparatet slås på. Det vil si at apparatet gjennomfører en fast prosess før det går av igjen.

Tabell 6-5 Tilleggsfunksjoner som kan benyttes for husholdningsapparater.

Sted	Utstyr	Tilstand	Styring
Kjøkken	Komfyr	Av, ulikeeffektnivå	Brukerstyrt
	Kjøkkenvifte	Av, hastighetsregulert	Brukerstyrt
	Kaffetrakter	Av, på	Brukerstyrt
	Oppvaskmaskin	Av, regulering sløyfe	Automatisert
	Kjøleskap	Av,	Automatisert

Bad	Fryseboks	Av, termostat styrt universalmotor	Automatisert
	Brødrister	Av, på	Brukerstyrt
	Mikrobølgeovn	Av, ulikeeffektnivå	Brukerstyrt
	Vaskemaskin	Av, regulering sløyfe	Automatisert
	Tørketrommel	Av, hastighetsregulert	Automatisert
	Hårføner	Av, ulikeeffektnivå	Brukerstyrt
	Barbermaskin	Av, på	Brukerstyrt
Stue	Tv	Av, på	Brukerstyrt
	Stereoanlegg	Av, på	Brukerstyrt
	Støvsuger	Av, på	Brukerstyrt
Ellers i boligen	Panelovner, varmekabel	Av, termostat på	Automatisert
	Vannoppvarming (VVB)	Av, termostat på	Automatisert
	Lys: Faseinnsnitt- og faseavsnitt	Av, på, 0-100 % av full sinusform	Brukerstyrt

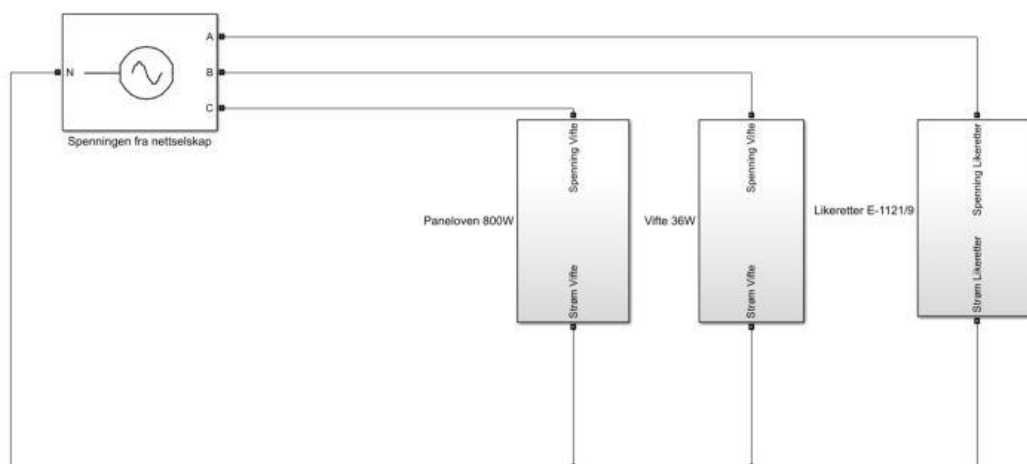
6.9 Forslag til struktur i Simulink for simulering av flere utstyr

I Figur 6-14 er et forslag til hvordan man kan koble opp flere typer utstyr i TN-nett ved simulering med metoden for modellering som er beskrevet i kapittel 6. Modellene som er beskrevet, kobles inn i mellom fase og n-leder. I figuren er det tilkoblet tre typer last; likeretter, vifte og panelovn. Ved bruk av denne oppkoblingen kan man modellere for ulike typer i nettsystemer, i dette tilfelle et TN-nett. Det kan enkelt utføres en analyse av aktiv effekt, reaktiv effekt, THD, fasespenning, linjespenning, fasestrømmer og linjestrømmer.

For analyse kan blokker fra biblioteket i Simulink benyttes til formålet, for å nevne noen:

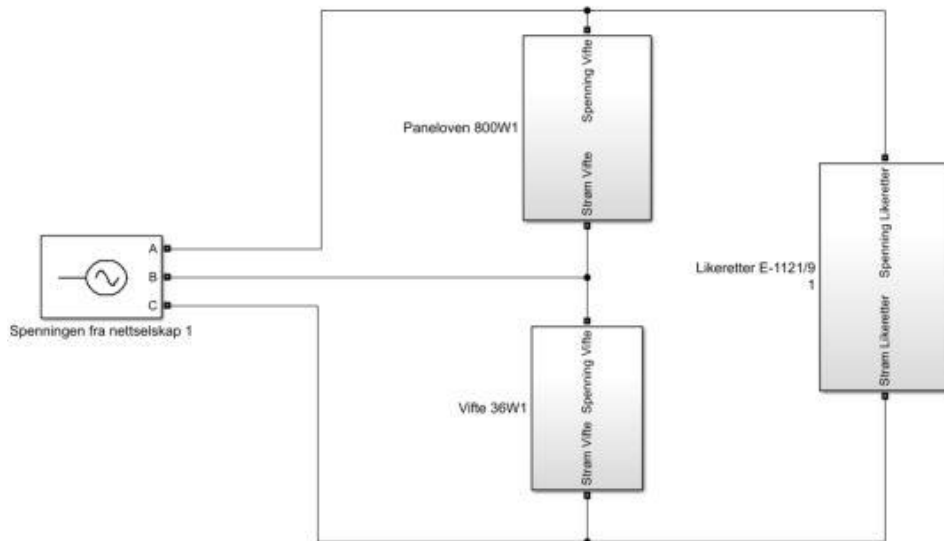
- «THD» blokk – beregner total harmonic distortion av et signal (best egnet for strømmen).
- «Power (3ph, Phasor)» blokk – beregner aktiv og reaktiv effekt ved bruk av trefasespenningen og fase strømmen.
- «Current Measuremen» blokk – måler strømmen i en krets.
- «Controlled Current Source» blokk – denne omformer en skalar verdi til et SimPowerSystem kompatibelt strøm/spennings-signal.

I disse to oppkoblingene er det fastsatt med stivt nett, der en trefasespenningskilde er oppsatt som kilde til utstyrene som er tilkoblet i TN- og IT nett.



Figur 6-14 Forslag til oppkoling av TN-nett.

I hver modell er det utført fasemodifiseringen, henholdsvis 0° , 120° og 240° . Dette er utført i subsystem-modellen på Figur 6-14 og Figur 6-15. For eksempel er fasemodifiseringen utført via tidsinngangen til modellen som blir forskyvet tilsvarende 120° mellom I_2 og I_N ($[\text{rad/s}] = [20\text{millisekund}/3]$). For IT-nett kan modellene for hvert enkelt utstyr benyttes likt som i TN-nett, men fase/linjespenning og oppkoblingen er annerledes. I Figur 6-15 er det utarbeidet et forslag for simulering av utstyr i et IT-nett. Man kan også koble til utstyr for å måle systemet som man ønsker.



Figur 6-15 Forslag til oppkobling IT-nett.

I IT-nett er utstyret koblet mellom faselederne og nominell spenningen er $230V \pm 10\%$. Ved denne metoden nevnt i dette kapitlet lar det seg ikke gjøre å evaluere for frekvensvariasjon, siden metoden tar analyse via den grunnharmoniske strømkomponenten og videre ut i frekvensspekteret til 1000 Hz. Om man hadde gått for en annen modelleringsmetode, burde det vært gjennomført analyse.

7 Verifikasjon med eksperiment

I dette kapittelet er formålet å bekrefte et utvalg av simulerte utstyr med eksperimenter. Det er valgt å teste noen typer utstyr på laboratoriet for å verifisere at modellene og metoden for rammeverket fungerer.

I det norske hjem er det ingen tvil om at det er stor økning av forbrukerlasten likeretter, og dette finnes i alt av forbrukerelektronikk som datamaskiner, PC-skjermer, batteriladere, hjemmekino, stereoanlegg, printere og lignende. Også elbilladere har en dominerende likeretterlast kurveform, som har vist stor vekst i Norge. Kjøringen med elbiler økte med 41 prosent fra 2016 til 2017[32]. På grunnlag av dette er det valgt å teste ut likeretterlast med verifikasjon også.

7.1 Eksperimentelt oppsett på laboratoriet

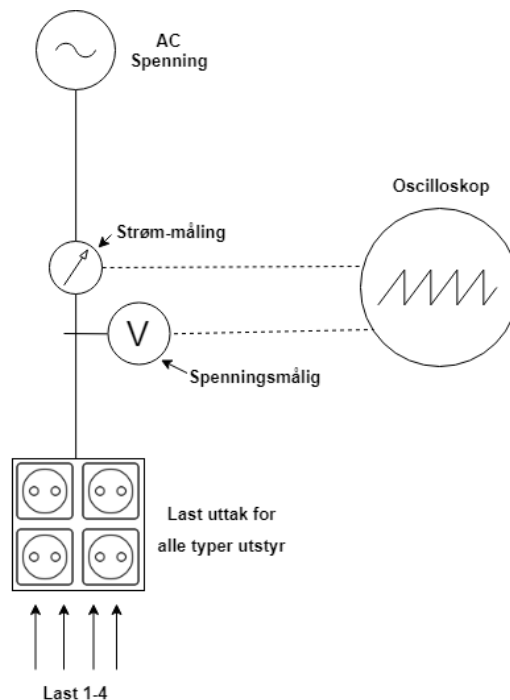
I Tabell 7-1 er en oversikt på benyttet utstyr på laboratoriet. På leverandørens utstyr for måling er det benevnt 1-3 % måleravvik på spenningsprobe og strømprobe til oscilloskopet. Dette er ikke unormalt for slikt måleutstyr, men greit å være orientert over dette avviket ved kurvesammenligning.

Tabell 7-1 Utstyrsliste på laboratoriet.

<i>Utstyr</i>	<i>Lab nummer</i>	<i>Innstilling</i>	<i>Bruk</i>
<i>Oscilloskop: Agilent infiniVision 2000 X</i>	EL 1531	Channel 1: DC 100:1 Channel 2: DC 10:1	Måleverktøy
<i>Tangamperemeter CP30 Current Probe</i>	E-1148/6	On, trykk Zero (nullstilling)	Måling av strøm(A/mA)
<i>LeCroy AP030 Differential probe</i>	SIN-L-0066.01	On, R:1/100	Måling av spennign (V)
<i>2 stk Fluke IV</i>	E-1087/11 og E-1087/12	V(vekselspenning) A/mA(vekselstrøm)	Kontroll måling av spenning og strøm
<i>Effektuttak planke</i>	Ingen		Tilkoblingskilde

Oppkobling på laboratoriet er illustrert i Figur 7-1, der amperemeter er koblet i serie - og voltmeter er koblet i parallell med strømmettet for korrekt avlesning. Man kan enkelt koble opp flere typer utstyr samtidig som har plugg tilkoblet utstyret med denne oppkoblingen. Det er viktig at innstillingen som er spesifisert på hvert utstyr i Tabell 7-1 blir fulgt, om ikke kan avlesning bli feil, som gjør utslag på tidsspesifiseringen og frekvensen spesifisering langs x-akse i Figur 7-4. For mer informasjon og konkret

framgangsmåte for laboratoriet, innstillinger på oscilloskopet og innhenting av vektorer til Simulink, se kapittel 7.2.



Figur 7-1 Oppkolingskjema på laboratoriet.

7.2 Prosedyrer for målinger, innstillinger oscilloskop og innhenting av koeffisienter

Denne prosedyren er laget for å kunne gjøre det enklere når man skal kunne modellere flere typer av husholdningsapparater. Ved å følge denne prosedyren skal man få generert koeffisientene til modellen i Simulink. Denne metoden er best egnet for hvert enkelt utstyr, altså man gjennomfører prosedyren for ett og ett utstyr for å så sette dem sammen i Simulink som beskrevet i kapittel 6.9. Når dette er gjennomført, kan man sette sammen flere typer i Simulink, tilkoblet et felles system, da gjerne i IT eller TN-nett.

7.2.1 Oppkobling av eksperiment

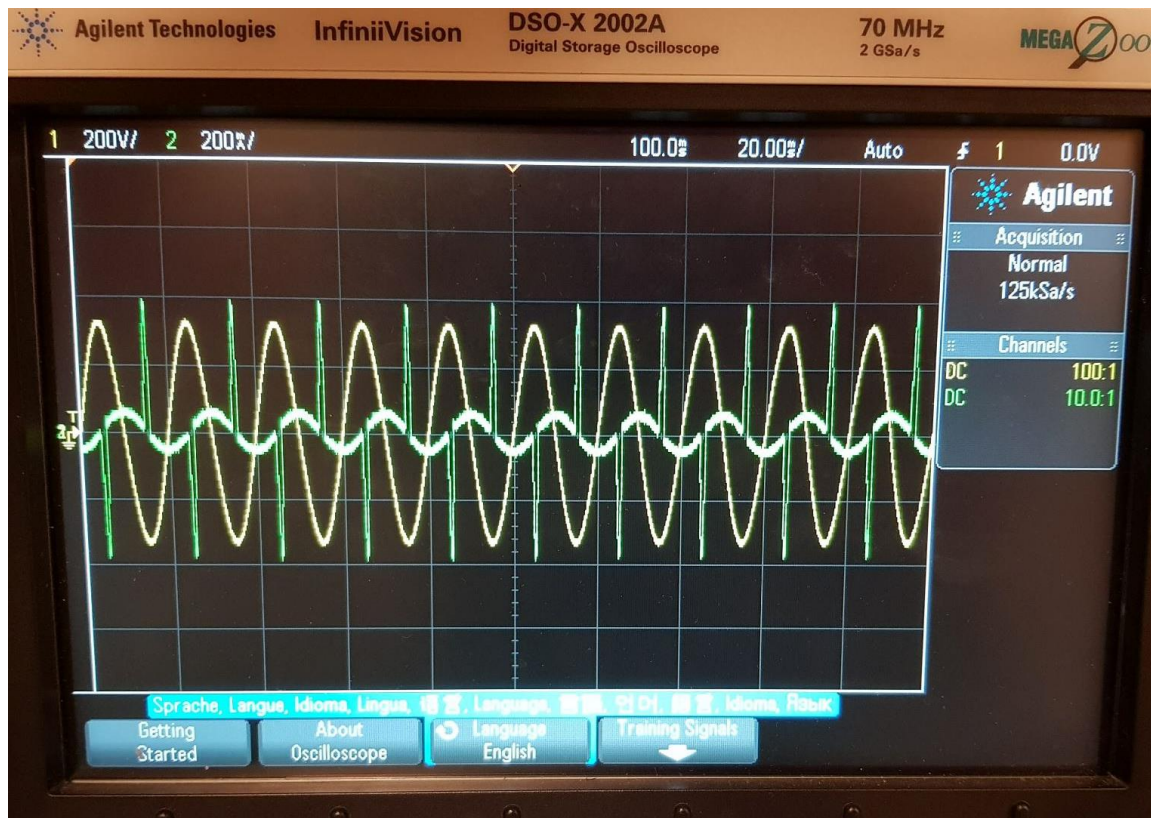
1. Koble opp strukturen på laboratoriet som vist i Figur 7-1.
2. Verifisere med riktig type måleutstyr for amperemeter og voltmeter (noen typer viser avvik i nøyaktighet). Bruk de i Figur 7-2.
3. Tangamperemeter skal kobles i riktig retning av strømmen, følg pilretningen på tangamperemeter. Amperemeter må nulles ut av og til, ved å trykke på Zero knappen.
4. Voltmeter skrur på og stilles på 1/100, kobles som vist på oppkoblingskjema.



Figur 7-2 Tangamperemeter til venstre, voltmeter til høyre.

7.2.2 Framgangsmåte for måling ved bruk av oscilloskopet

1. Sette opp innganger til Oscilloskop:
 - 1.1 Spenningsmåling på inngang 1
 - 1.2 Strømmmåling på inngang 2
2. Konfigurer innstillinger på Oscilloskop til følgende:
 - 4.1 Stille **probe 1 (spenning)**: til channel 100:1 og coupling på DC.
 - 4.2 Stille **probe 2 (strøm)**: til channel 10:1 og coupling på DC.
5. Konfigurer rutenett innstillinger på Oscilloskop:
 - 5.1 Sett både Channel 1 & 2 referanse til 0 på x-akse. Sett begge til start på nullgjennomgang.
 - 5.2 Rute størrelse 20.00 m/s.
 - 5.3 Sett channel 1 & 2 til lik størrelses orden, øverst til venstre på skjermdisplay på oscilloskop (Figur 7-3).
 - 5.4 Sett Trigger til 0.0V, øverst til høyre på Figur 7-3.
 - 5.5 Trigger bør stilles til kanal 1, slik at bildet er synkronisert etter spenningen.
6. Når oppsettet er riktig og måling på utstyret er gjennomført: lagre fil til minnepenn.
 - 6.1 Sett inn USB minnepenn
 - 6.2 Trykk save → CSV data (*.csv) → File Name → Gi navn til utstyret som skal til Matlab/Simulink.
 - 6.3 Trykk Press to Save
 - 6.4 Nå ligger filen lagret på innplugged USB penn.
7. Importer filen til Matlab/Simulink, se neste avsnitt.



Figur 7-3 Eksempel på korrekte innstillinger på oscilloskop.

7.2.3 Beskrivelse av fft analyse og oppsett i Simulink/Matlab.

1. Åpne Matlab og velg Import Data under fanen hjem. Åpne filen .csv fil fra oscilloskopet, velg «Numeric Matrix», trykk Import.
2. Kjør load kommand på følgende filer:
 - 2.1 Skape koeffisienter_Måling_til_SimulinkModell.m
 - 2.2 H_sim_tabell.mat
 - 2.3 H_sim_data.mat
 - ➔ Se vedlegg A, Matlab koder.
 - ➔ Se vedlegg A, Simulink modeller.
3. Endre FILNAVNET i script på RAD 2. (Til selvlaget navn på USB penn). Se Figur 7-4.
4. Nå legges den nye filen i nederste Rad i tabell(automatisk): H_sim_data.mat
5. Gå i Tabell: H_sim_tabell. Skrive inn to ting manuelt: Navn ID og Data_rad, og koble den til ønsket navn i modellen.
6. Når dette er gjennomført, åpner man generell last modell i Simulink.
7. Dobbeltklikk på modellen, og velg ønsket parameter og den riktige type last.
8. Om NYTT navnet til lasten i nedtrekkmenyen ikke er riktig, kan denne justeres ved høyreklikk, edit mask, velg dialogbox, og velg første combobox. VELG Combox options, der kan man justere teksten og legge til den ønskelige lasttypen. Viktig at navnene her, samsvarer med navn i punkt.4. Om ikke vil det ikke funke!
9. Nå kan simulering kjøres og sette sammen etter ønske.

```

1  %%For nye målinger, lages nye koeffisienter gjennom FFT analysen nendenfor.
2  %% Utfør som beskrevet:
3
4  Data_inn = viftelikeretter; % SKRIV HER, endre til det FILNAVNET fra USB i oscilloskopet!
5                               % Etter endret navn på impotert fil,
6                               % trykk"RUN" og NYE vektorer lagres i
7                               % H_sim_data
8
9  %% Tids-Spesifisering
10 Fs = 1/(Data_inn(2,1)-Data_inn(1,1));%Fs=1/(t2-t1)
11 dt = 1/Fs;%Tid mellom hver sampling
12 StartTime = 0;
13 WindowStart = 1;%0.02 * 10 * Fs;
14 WindowSize = WindowStart + 1999;
15
16 %% Generere tidsdomene. Dette er signal fra eksperiment
17 t = Data_inn(WindowStart:WindowSize,1)-Data_inn(1,1);%Tids vektor
18 w = 2*pi*50; %Fundamentale frekvens (50Hz)
19 v = Data_inn(WindowStart:WindowSize,2);
20 i = Data_inn(WindowStart:WindowSize,3);
21
22 %%FFT analyse
23 I = fftshift(fft(i));
24
25 %%Speifisere frekvens for x-akse:
26 N = size(t,1); %Antall av sampling
27 dF = Fs/N;
28 f = -Fs/2:dF:Fs/2-dF;%x-axis i Hertz
29 I_fft_RMS = abs(I)/N*2/sqrt(2);
30
31 %% Avsnitt for å finne vinkler til gjenskapning av kurveform
32 Fasel=atan2(imag(I),real(I))+pi/2; %funksjon som finner vinkler ut av strømmen
33 %% Rensking av fase, strøm og frekvens vektor. For 20 overharmoniske(1000Hz)
34 Faser=Fasel(1001:10:1201)';
35 Strom=I_fft_RMS(1001:10:1201)';
36 Frekvens=f(1001:10:1201);
37
38 %% Tabell for nye verdier, kommer som ny rad i OppsettNotel:
39 H_sim_data = [H_sim_data;[Strom Faser Frekvens]];

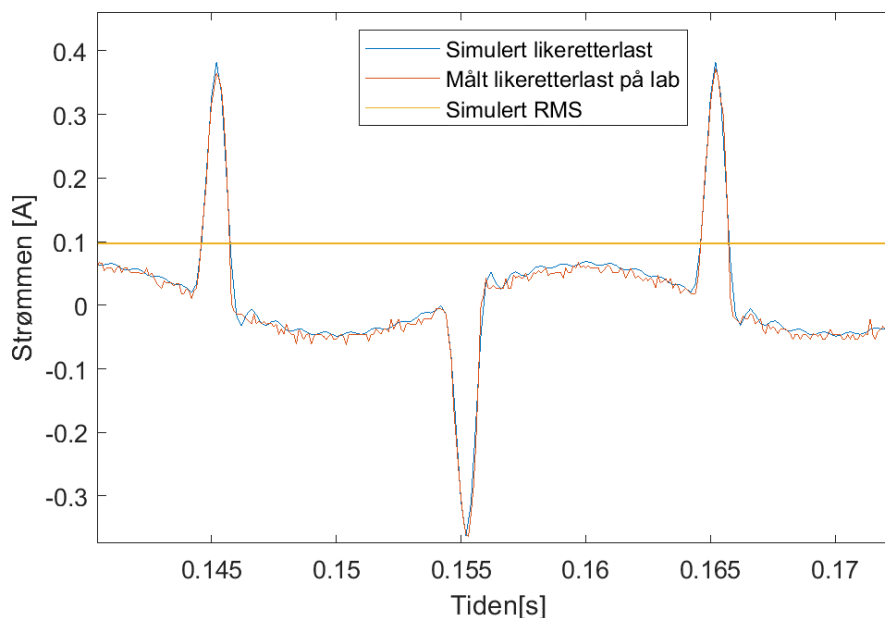
```

Figur 7-4 Script for FFT og oppsett til modellene.

7.3 Målte husholdningsapparater verifisert med modellen

Formålet med kapittelet er å verifisere om modellene i Simulink er formlike med målinger av oppkoblet utstyr på laboratoriet. Ved å verifisere at simulering er like med målinger, vil man avklare om metoden er fungerende og tilfredsstillende for rammeverket i avhandlingen. Det ble plukket ut tre typer utstyr fra ulike kategorier for å få dekket de fleste type laster. Grunnen til at likeretterlast ble valgt, er at denne typen er mye benyttet i forbrukerelektronikk i dag. De har også egenskaper med ekstra bratte kurveformer, denne lasttypen.

På laboratoriet tilkobles en strømforsyning av typen GW instek SPS -606 satt sammen som beskrevet på oppkolings skjema i Figur 7-1 og utført måling av spenningen og strømmens kurveform via oscilloskop. Etterfulgt for å kunne sammenligne disse, ble modellen for en strømforsyning modellert basert på strukturen i kapittel 6.3. Sammenligningen av den simulert kurveformen og målte likeretter lasten er vist i Figur 7-5.

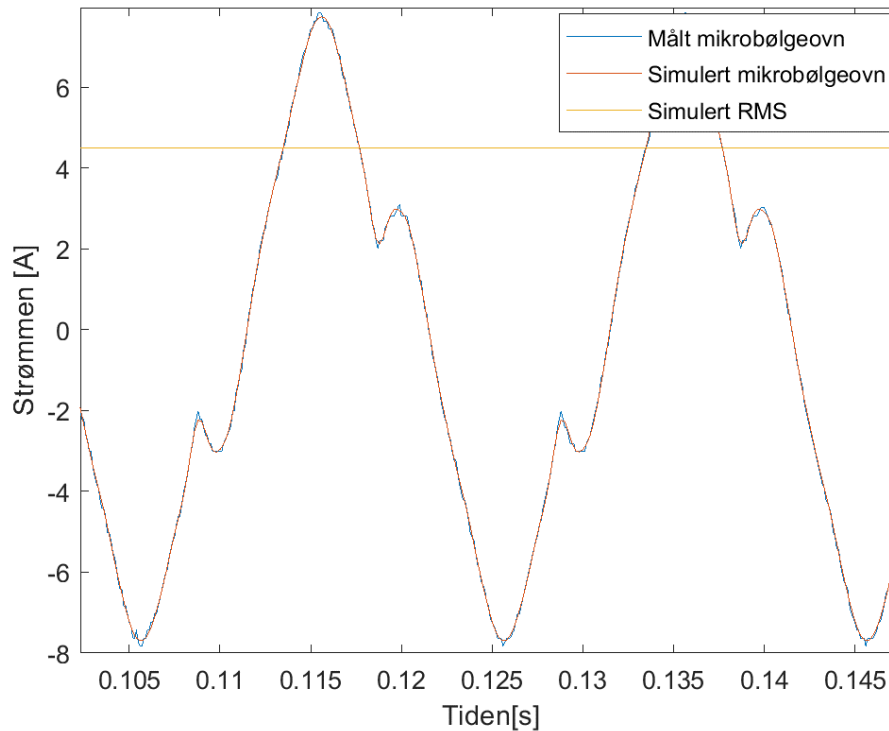


Figur 7-5 Simulert likeretterlast sammenlignet med målt likeretterlast på laboratoriet.

Spenningen til den simulerte er synkronisert med den målte og tas ikke med i figurene. Dette for enklere å se differansen ved kurvesammenligningen. Observasjon på den målte strømforsyningen viser at det er tilkoblet et filter som skaper en bølgeform ved nullgjennomgang på strømmen, i tillegg vises noe støy på målingen.

Det største avviket er like etter nullgjennomgang der har kurveformen en bratt endring og gir maksimalt differanse på 25 mA ved $t = 0.1562s$. Avviket mellom kurvene er på 24% av strømmens rms-verdi på 104 mA. Ved toppverdien («peak value») er differansen 10.6mA.

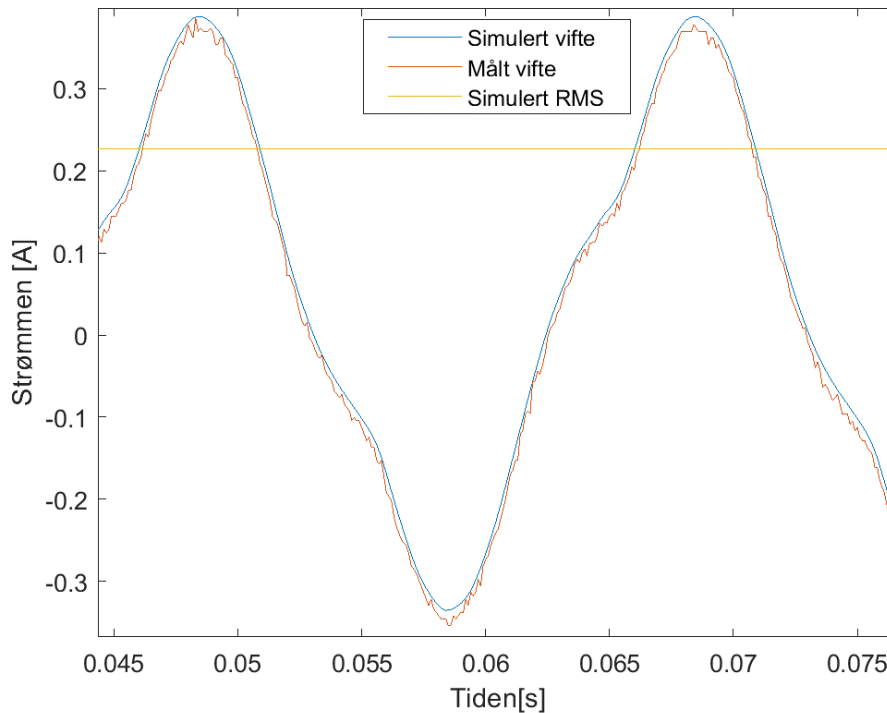
Etterfulgt ble samme prosedyre gjennomført på en ulineære last, en mikrobølgeovn på 1,15 kW. Man ser fra Figur 7-6 at modellens simulering i oransje er godt tilfredsstillende på kurvegjenskapning mot denne målte mikrobølgeovnen. For sammenligningen ved mikrobølgeovnen gjør den simulerte modellen litt mindre avvik og rippel i strømmen enn den målte. Dette kan forklares med at ved slike nøyaktige sammenligninger, vil støyen fra målingen bli visende på strømkurven.



Figur 7-6 Simulert mikrobølgeovn(1,15kW) sammenlignet med målt mikrobølgeovn(1,15kW) på laboratoriet.

På denne sammenligningen var spenningen synkronisert med hverandre. Den største differansen mellom simulert og målte er på 228mA ved $t = 0.1288s$ i forhold til strømmens rms er avviket 4.85 % av strømmens rms på 4.7A.

Til slutt ble en motordominerende last sammenlignet, en vifte på 36W modellert og simulert ved verifikasjon i Figur 7-7.

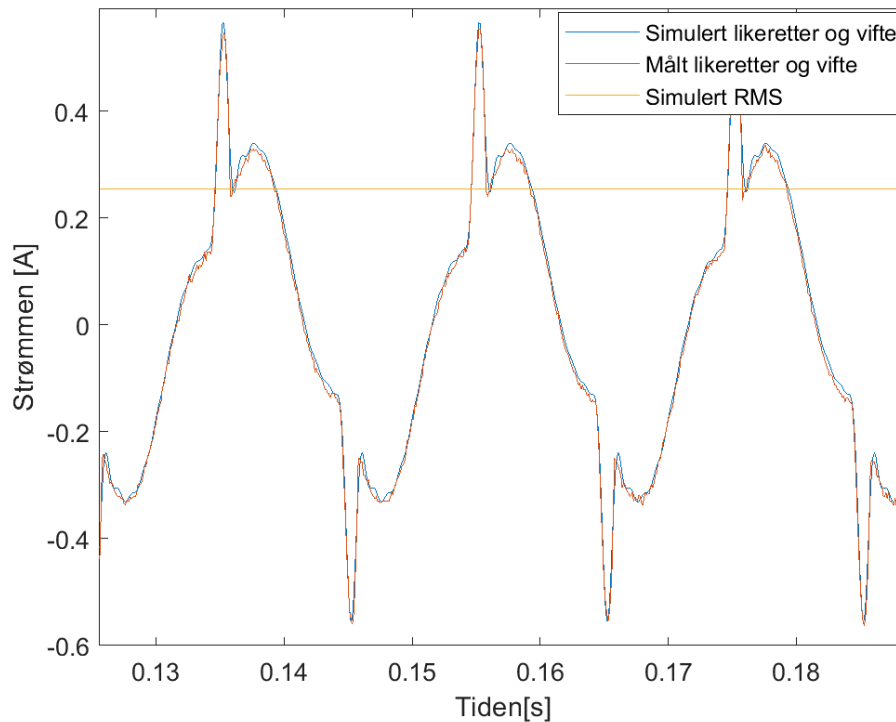


Figur 7-7 Simulert vifte(36W) sammenlignet med målt vifte(36W) på laboratoriet.

På Figur 7-7 er avviket på 18,9 mA ved $t = 0.0684s$ mellom den simulerte-og målte viften. Dette avviket utgjør 7.97 % relativt til strømmens rms på 237 mA. Denne måten å representere sammenligningen over en periode, fremhever differansen mer nøyaktig enn ved over flere perioder. I Figur 7-7 ser det ut til å være en liten offset-feil siden den simulerte er noe høyere enn den målte på laboratoriet, noe som gjør avviket mellom de to kurvene noe høyere.

7.4 Verifikasjon med flere utstyr tilkoblet

Formålet med kapittelet er å verifisere om flere modeller som settes sammen i Simulink er formlike med fysiske målinger oppkoblet på laboratoriet. Ved å verifisere med denne metoden kan man avklare om metoden for modellering er fungerende og tilfredsstillende når flere utstyr tilkobles i husholdningen. På laboratoriet tilkobles en vifte og en strømforsyning satt sammen som beskrevet på oppkoblingsskjema i Figur 7-1 og utført måling av spenningen-og strømmens kurveform via oscilloskop. Etterfulgt for å kunne sammenligne disse, ble modellen for en vifte og strømforsyning modellert baser på oppsett i kapittel 6.3 etablert i Simulink.



Figur 7-8 Simulert vifte og likeretter sammenlignet målt vifte og likeretter på laboratoriet.

På Figur 7-8 er avviket på 20 mA ved $t = 0,1461\text{s}$ mellom den simulerte-og målte viften og strømforsyningen. Dette avviket utgjør 7,63 % relativt til strømmens rms på 262 mA. Spenningen er synkronisert med og tas ikke med i plot for å fremvise differansen forskjell på strømkurven og dens nøyaktighet i kurvesammenligningen. Slik metoden er bygget og utviklet vil det gi samsvar når man sammenligner målte og simulerte verdier for alle utstyrene som er blitt verifisert. Det er noe mer avvik på strømkurven til strømforsyningen, på grunn av at fourier-rekken er konstruert av sin-og cosinus ledd, som gjør at ved brattere endringer er det vanskeligere å rekonstruere simuleringen. Dette er ikke et stort problem grunnet at størsteparten av kurven er tilnærmet lik den målte som vist på Figur 7-5. En eventuell løsning er å etablere flere overharmoniske komponenter i fourier-rekken til modellen, men ulempen med dette er at simuleringstiden blir for tidkrevende.

7.5 Oppsummering og resultater fra verifikasjon

I kapittel 7.3 ble tre typer utstyr simulert og verifisert med målinger på laboratoriet med hensikt å sammenligne deres kurveform og eventuelle ulikheter. Videre ble det i kapittel 7.4, satt sammen to typer utstyr med ulik karakteristikk for å verifisere om formlikhet på de simulerte mot samme type utstyrsmålinger oppkoblet på laboratoriet. Rammeverket er bygget slik at det vil gi godt samsvar mellom målte verdier på laboratoriet og simulerte verdier i Simulink.

8 Konklusjon og anbefalinger til videre arbeid

8.1 Konklusjon

Den elektroniske utviklingen har økt og dermed graden av elektroniske utstyr som kan tilkobles i norske husholdninger. Kanskje er det flere tusen typer utstyr som kan tilkobles husholdninger, derfor ble det gjennomført en kategorisering av utstyrene basert på sine karakteristikk/egenskaper. Det ble evaluert flere metoder for å løse oppgaven med et felles rammeverk for de elektriske utstyrene.

I rapporten er det blitt utviklet en metode å modellere elektriske husholdningsapparater via fourier-rekker, og det ble benyttet "fast fourier transform" for å fremskaffe koeffisientene til rekken. Basert på dette er det utarbeidet et rammeverk for modellering og simulering av husholdningsapparater i Simulink, hvor det er muligheter for sammenkobling av flere enheter basert på typiske utstyr i norske husholdninger. Tilkoblingen av modellene kan være via TN-nett, IT-nett eller andre mindre kilder i Simulink.

Til slutt ble et utvalg av simulerte apparater verifisert med eksperimenter. Elektrisk utstyr ble målt og simulert for hvert enkelt utstyr, men også sammenkoblet med flere husholdningsapparater. Utstyr fra forskjellig kategori ble simulert med metoden og verifisert med målinger på følgende utstyr:

- Strømforsyning GW instek SPS -606
- Vifte 36 W
- Mikrobølgeovn 1.15 kW
- Kombinasjon av strømforsyning GW instek SPS -606 og Vifte 36 W

Resultatet fra verifikasjonen viste godt samsvar mellom simulerte utstyr og målte utstyr på laboratoriet.

8.2 Anbefalinger til videre arbeid

Beskrivelse av ulike egne synspunkter som kan bygges videre. Disse er satt opp punktvis:

- Utvide dialogvindummuligheter for valg etter rom-inndeling, som vist i Tabell 6-1. En god løsning ville være ved bruk av parameter «Combo box» i dialogvinduet via callback script. Altså en dynamisk «mask dialog box».
- Videreutvikle kontrollsignal, bygge videre på kapittel 6.5 og 6.8. I kapittel 6.8 er det beskrevet noen av alternativene som kan videre utvikles.
- Det er en egen funksjon som tar fast fourier transform av signaler i oscilloskopet på laboratoriet. Oscilloskop type: Agilent infiniVision 2000 X. Så anbefaler jeg videre å evaluere og om mulig implementere en smartere måte å få koeffisientene fra oscilloskopet til .csv fil til Matlab og inn til den konstruerte modellen i Simulink.
- Videreutvikle sekvenskontroll for de typer utstyr som behøver dette, etter å ha innhentet mange utstyrstyper. En løsning er beskrevet i kapittel 6.6, ta videre å spesifisere sekvenskontroll hvert enkelt utstyr, som har behov for det.
- Å utvide modellen for å kompensere for linjeimpedans, slik at modellen tar høyde dynamisk faseforskyvning til oppkobling av modellene i kapittel 6.9.
- Gjennomføre analyse på utstyr i delkapittel 7.3 og delkapittel 7.4, med tanke på aktiv effekt, reaktive effekt og overharmoniske forstyrrelser (THD_i/THD_v). En slik analyse er gjennomført i [8], hvor tabell 1, 2 og 3 gjennomfører dette på tre ulike typer utstyr.
- Forvrengte kurveformer som gir THD, slik som likeretterlaster, og gjerne av større størrelses orden, kunne vært interessant og satt sammen i en større skala. Dette for å se hvor store utfordringer flere større laster med forvrengninger kan gi og hvor mye innvirkning det kan gi på strømmettet i boligen.

Referanser

- [1] "Standard load models for power flow and dynamic performance simulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1302-1313, 1995.
- [2] F. A. Qayyum, M. Naeem, A. S. Khwaja, A. Anpalagan, L. Guan, and B. Venkatesh, "Appliance Scheduling Optimization in Smart Home Networks," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2176-2190, 2015.
- [3] J. Molina and L. Sainz, "Model of Electronic Ballast Compact Fluorescent Lamps," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1363-1371, 2014.
- [4] D. Li, T. F. Bissyandé, S. Kubler, J. Klein, and Y. L. Traon, "Profiling household appliance electricity usage with N-gram language modeling," in *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2016, pp. 604-609.
- [5] C. Wagner, C. Waniek, and U. Häger, "Modeling of household electricity load profiles for distribution grid planning and operation," in *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2016, pp. 1-6.
- [6] E. H. Et-Tolba, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, "Smart home appliances modeling and simulation for energy consumption profile development: Application to Moroccan real environment case study," in *2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2016, pp. 1050-1055.
- [7] G. Ye, M. Nijhuis, V. Cuk, and J. F. G. Cobben, "Appliance-based residential harmonic load modelling," in *2017 IEEE Manchester PowerTech*, 2017, pp. 1-6.
- [8] M. J. H. Rawa, D. W. P. Thomas, and M. Sumner, "Experimental Measurements and Computer Simulations of Home Appliances Loads for Harmonic Studies," in *2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, 2014, pp. 340-344.
- [9] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu, and S. Rahman, "An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2166-2173, 2012.
- [10] S. L. Arun, A. A. Raj, and M. P. Selvan, "Demand response in smart buildings through time-varying priority of household appliances," in *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, 2017, pp. 1-5.
- [11] Virginia Tech Advanced Research Institute. (2018). *Research Data* [Online]. Available: <http://www.ari.vt.edu/research-data/>
- [12] L. Stensvold and N. Høgskolen i, "Load characteristics and power quality in the future Norwegian households : [masteroppgave i teknologi ved Høgskolen i Narvik, studieretning Electrical Engineering]," ed. Narvik: <Forfatteren>, 2015.
- [13] Ø. Kjeldstad, E. H. Hansen, and F. f. I. M. O. E. I. f. E. Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, "Dimensjonering av ledertverrsnitt i anlegg med overharmoniske strømmer," ed: Institutt for elkraftteknikk, 2010.
- [14] D. Mathisen, "Konsekvenser av overharmoniske strømmer og spenninger fra elektronisk utstyr i lavspenningsanlegg," E. H. Hansen, Ed., ed: NTNU, 2015.
- [15] Erik Cheever. (2014, 01.05.2018). *Transformation: Transfer functrion, State Space* [Online]. Available: <http://lpsa.swarthmore.edu/Representations/SysRepTransformations/TF2SS.html>
- [16] M. Grady, "Understanding power system harmonics. Technical report," Dept. of Electrical Computer Engineering - University of Texas at Austin, Report 2012.
- [17] Techopedia. (2018). *Fast Fourier Transform (FFT)* [Online]. Available: <https://www.techopedia.com/definition/7167/fast-fourier-transform-fft>
- [18] E. H. Hansen, *Elektroinstallasjoner*, Utg. 2010. ed. Trondheim: Classica, 2010.

- [19] *Elektriske lavspenningsinstallasjoner = Electrical low voltage installations*, 5. utg. ed. (NEK (trykt utg.)). Oslo: Norsk elektroteknisk komité, 2014.
- [20] Akerhus Enøk og Inneklima AS. (2018). *Enøkguiden* [Online]. Available: https://www.enok.no/enokguiden/09_1.html
- [21] R. T. Paynter and B. J. T. Boydell, *Electronics technology fundamentals : conventional flow version*, 3rd ed. ed. Upper Saddle River, N.J: Pearson Prentice Hall, 2009.
- [22] N. Mohan, *Power electronics : converters, applications, and design*, 3rd ed. ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2003.
- [23] Howling Pixel. (2017). *Vekselstrøm* [Online]. Available: <https://howlingpixel.com/wiki-no/Vekselstr%C3%B8m>
- [24] Glamox. (2018). *Grunnleggende om LED* [Online]. Available: <http://glamox.com/no/grunnleggende-om-led>
- [25] S. Bua, O. V. Thorsen, and M. Dalva, *Roterende elektriske maskiner*, 2. utg. ed. Oslo: Universitetsforl., 1987.
- [26] Trond Ostrem, *Roterende elektriske maskiner*. Narvik: Hogskolen i Narvik, 2012.
- [27] *Krav til leveringspålitelighet og spenningskvalitet*, Online, 2004.
- [28] J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, and J. Machowski, *Power system dynamics : stability and control*, 2nd ed. ed. Chichester: Wiley, 2008.
- [29] C. S. Indulkar and K. Ramalingam, "Load Flow Analysis with Voltage-Sensitive Loads," in *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, 2008, pp. 1-6.
- [30] IBM Knowledge Center. (2018). *Timing diagram components Dishwasher* [Online]. Available: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSB2MU_8.1.5/com.ibm.rhp.uml.diagrams.doc/topics/r_time_diagram.html
- [31] Control Guru Practical Process Control. (2015). *Sample Time is a Fundamental Design and Tuning Specification* [Online]. Available: <https://controlguru.com/sample-time-is-a-fundamental-design-and-tuning-specification/>
- [32] Statistisk sentralbyrå Statistics Norway. (2018). *Sterk vekst i kjøringen med elbiler og hybrider* [Online]. Available: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/artikler-og-publikasjoner/sterk-vekst-i-kjoringen-med-elbiler-og-hybrider>

Vedlegg

Vedlegg A – Zip fil - Matlab koder, Simulink modellen, relevante vurderinger