



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2024 30 stp

Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA)

Utfordringer og muligheter med elbiler og effektivisering i fremtidens energisystem

Challenges and opportunities with electric cars and
efficiency in the future energy system

Marie Eide Roalkvam

Fornybar Energi

I. Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på graden min i Fornybar Energi ved NMBU. Oppgaven ser på spenningskvalitet ved en elbil med V2G funksjonalitet tilkoblet Energilaboratoriet i Fløy IV. Målinger har blitt gjort ved å analysere spenningskvalitet ved opp og utladning ved ulike effektnivåer. Det har blitt sett på spenningskvalitet ved opp og utladning, ved endringer i aktiv effekt og SOC, og ved temperaturendringer.

Jeg vil takke hovedveileder Thomas Martinsen og biveileder Heidi S.Nygård for veiledning og tilbakemeldinger underveis i prosessen. Jeg vil også takke Muhammed Tabish Parray for hjelp med å sette opp forhåndskonfigurerte effekter for laderen og svar på spørsmål. I tillegg vil jeg takke Marko Jakovljevic for hjelp med oppsett av måleinstrumentet og svar på spørsmål. Videre vil jeg takke Ingrid Helene Nærstad for utlån av elbil. Dessuten vil jeg rette en takk til familie og venner for oppmuntring og støtte gjennom perioden.

Marie Eide Roalkvam

Mai 2024

II. Sammendrag

Et stadig økende elektrisitetsbehov i samfunnet skaper større belastning på kraftnettet. Dette spesielt som følge av et høyere antall elbiler. Ved utgangen av 2023 var det 689 169 elbiler og disse utgjorde tre fjerdedeler av nybilsalget i Norge. Det er viktig å opprettholde god spenningskvalitet i nettet ved tilkobling av elbiler. V2G er en ny smart ladeteknologi som muliggjør strømflyt fra elbilen til nettet. Potensielt kan V2G bidra til å forbedre spenningsprofilen i nettet.

V2G kan også benyttes som elektrisitetsstøtte til kraftnettet. Dette kan gjøres sammen med andre elektrisitetsproduserende enheter som for eksempel solcellepaneler. Hvilket kan kreve at effekten fra V2G ladere er under den nominelle. For å få mest nytte av V2G sammen med andre enheter bør spenningskvaliteten for V2G ved lavere aktive effektnivåer være innenfor forskriftsatte grenser. Dette for å unngå slitasje og ødeleggelse på elektriske apparater. Norge har varierende utendørstemperaturer på sommer og vinter. Det er viktig at spenningskvaliteten ved tilkobling av elbiler holder seg innenfor forskriftsatte grenser hele året.

I oppgaven blir spenningskvalitet utforsket gjennom et forsøk hvor en elbil med V2G funksjonalitet tilkobles en bygning. Resultater fra forsøket viser spenningsfall og ubalanse ved oppladning og forbedret spenningsprofil ved utladning. Spenningsfall og ubalanse kan knyttes opp mot reduksjon i reaktiv effekt, mens forbedret spenningsprofil kan knyttes mot en økning i reaktiv effekt. Det observeres liten forskjell i harmoniske forstyrrelser, THDi og effektfaktor ved oppladning og utlading av elbilen.

Ved endringer i effektnivåer under den nominelle, kan økende harmoniske forstyrrelser og verdier av THDi observeres. Effektfaktoren reduseres ved reduksjon i aktive effektnivåer. De harmoniske strømmene er utenfor grenseverdiene for 61000-3-12 standard ved både oppladning og utladning. Flere grenseverdier overskrides ved lavere effektnivåer. Ved økte temperaturer ses det ingen tydelig forbedring i hverken harmoniske forstyrrelser, THDi eller effektfaktor. Det kan derimot observeres en liten forbedring i spenningsubalanse.

III. Abstract

An increasing demand for electricity in society creates a greater load on the power grid. This is particularly because of a higher number of electric cars. At the end of 2023, there were 689 169 electric cars and these accounted for three quarters of new car sales in Norway. When connecting the electric cars, it is important to maintain good voltage quality in the grid. V2G is a new smart charging technology that enables electricity to flow from the car to the grid. V2G can potentially help improve the voltage profile in the network.

It is also possible to utilize V2G as electricity support for the grid. This can be done together with other devices that produce electricity such as solar panels. Something that may require the power from V2G chargers to be below the nominal. To get the most benefit from V2G together with other devices, the voltage quality for V2G should be within regulatory limits at lower power levels. This to avoid wear and tear on electrical appliances. Norway has varying outdoor temperatures in summer and winter. It is important to hold the voltage quality within prescribed limits throughout the year when connecting electric cars to the grid.

In this thesis, voltage quality is explored through an experiment where an electric car with V2G functionality is connected to a building. Results from the experiment show voltage drop and imbalance when charging and improved voltage profile when discharging. Voltage drop and imbalance can be linked to a reduction in reactive power, while an improved voltage profile can be linked to an increase in reactive power. Minor difference can be observed in harmonic disturbances, THDi and power factor when charging and discharging the electric car.

When the power levels are below their nominal levels, increasing harmonic disturbances and values of THDi can be seen. The power factor is reduced by a reduction in active power levels. Harmonic currents are outside limit values for the 61000-3-12 standard during both charging and discharging. Several of the limit values are exceeded at lower power levels. When the temperature increases, no improvement can be observed in harmonics, THDi or power factor. However, it is possible to observe a slight improvement in voltage imbalance.

IV. Ordliste og begrepsforklaring

AC	Vekselstrøm
CCS	Combined charging system
Chademo	Lading på farten
DC	Likestrøm
DC link	En kapasitans som knytter sammen vekselretter og likeretter
DPF	Forskyvningseffektfaktor
EV	Electric Vehicle
FOL	Forskrift om leveringskvalitet
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LCL filtre	Filtre bestående av to induktorer og en kondensator
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
PAT2	Dataeksportprogramvare
Pcon	Ledningstap
PF	Effektfaktor
Psw	Svitsjetap
PWM kontroll	Pulsbreddemodulasjonkontroll
SOC	State of Charge
THD	Total harmonisk forvrengning
Urms	Spenningsens effektverdi
V2G	Vehicle-to-Grid
Vdc	DC spenning

Innhold

1. Innledning	1
2. Teoretisk rammeverk	3
2.1 <i>Lademetoder og teknologier for elbiler</i>	3
2.1.1 Lademetoder	3
2.1.2 Ladeteknologier	4
2.2 <i>Bidireksjonale V2G ladere</i>	5
2.2.1 Ladestruktur	5
2.2.2 Filter	6
2.2.3 AC/DC og DC/DC omformere	7
2.2.4 Effektivitet og tap i ladere	8
2.2.5 Energilagringssystem	9
2.3 <i>Elektriske belastninger og kraftsystemet</i>	10
2.3.1 Lineære belastninger	10
2.3.2 Ikke lineære belastninger	11
2.3.1 Ideelt kraftsystem	12
2.4 <i>Spenningskvalitet, standarder og sikkerhet</i>	13
2.4.1 Langsomme variasjoner i spennings effektverdi	13
2.4.2 Spenningsusymmetri	14
2.4.3 Harmoniske overspenninger og THD	15
2.4.4 Frekvens	17
2.4.5 Standarder	17
2.4.6 Sikkerhet relatert til spenningskvalitet	18
2.5 <i>Effekter ved tilknytning av V2G til distribusjonsnettet</i>	19
2.5.1 Effekter ved opplading og utlading	19
2.5.2 Effekter ved endring i aktiv effekt og SOC	20
2.5.3 Effekter ved temperaturvariasjoner	21
2.5.4 Aktiv og reaktiv effektkontroll	22
2.5.5 Sammenfatning	23
3. Materialer og Metode	25
3.1 <i>Energilaboratoriet</i>	25
3.1.1 Elektriske komponenter tilkoblet kretsen	26
3.2 <i>Måleutstyr</i>	27
3.2.1 Nettanalysator	27
3.3 <i>Oppkobling av måleutstyr</i>	27
3.3.1 Forsøksoppsett	27
3.4 <i>Gjennomføring av målinger</i>	29
3.4.1 Kalibrering av måleutstyr	29
3.4.2 Måleperioder	30
3.4.3 Endring i parametere	30

3.5	<i>Databehandling og analyse</i>	31
3.5.1	Innsamling av data	32
3.5.2	Bearbeiding av data	32
3.5.3	Beregninger	32
3.6	<i>Feilkilder</i>	33
4.	Resultater	35
4.1	<i>Spenningskvalitet ved opplading og utlading</i>	35
4.1.1	Spenningsendringer og spenningsubalanse	35
4.1.2	Harmoniske, THDi og effektfaktor	37
4.2	<i>Spenningskvalitet ved endring i aktiv effekt og SOC</i>	40
4.2.1	Spenningsubalanse og reaktiv effekt ved aktive effektnivåer	40
4.2.2	Harmoniske, THDi og effektfaktor ved forandring i aktiv effekt	41
4.2.3	THDi og effektfaktor ved endring i SOC	44
4.3	<i>Spenningskvalitet ved temperaturvariasjoner</i>	46
4.3.1	Spenningsubalanse	46
4.3.2	Harmoniske, THDi og effektfaktor	46
5.	Diskusjon	49
5.1	<i>Spenningskvalitet ved opplading og utlading</i>	49
5.1.1	Spenningsendringer og spenningsubalanse	49
5.1.2	Harmoniske, THDi og effektfaktor	51
5.2	<i>Spenningskvalitet ved endring i aktiv effekt og SOC</i>	52
5.2.1	Spenningsubalanse og reaktiv effekt ved aktive effektnivåer	52
5.2.2	Harmoniske, THDi og effektfaktor ved forandring i aktiv effekt	53
5.2.3	THDi og effektfaktor ved endring i SOC	55
5.3	<i>Spenningskvalitet ved temperaturvariasjoner</i>	56
5.3.1	Spenningsubalanse	56
5.3.2	Harmoniske, THDi og effektfaktor	57
6.	Konklusjon	58
7.	Videre arbeid	59
8.	Referanser	60
	<i>Vedlegg A</i>	63
	A.1 Linjespenning og effekt med elbil	63
	A.2 Linjespenning uten elbil	64
	<i>Vedlegg B</i>	65
	B.1 Fasespenning og effekt med elbil	65
	B.2 Fasespenning uten elbil	66
	<i>Vedlegg C</i>	67
	C.1 Aktiv og reaktiv effekt	67
	<i>Vedlegg D</i>	69

D.1 THDi og effekt med elbil.....	69
D.2 THDi uten elbil.....	70

Tabelliste:

Tabell 2-1: Grenser for individuelle harmoniske spenninger med nominell spenning mellom 230 V og 35 kV (Lovdata, 2004).	16
Tabell 2-2: Harmoniske strømgrenser fra IEC 61000-3-12 internasjonal standard (Wang et al., 2024).	17
Tabell 4-1: Spenningsubalanse ved utladning, uten elbil og ved oppladning.	36
Tabell 4-2: Gjennomsnittlige harmoniske forstyrrelser i strømkurven ved lav og høy effekt for fase 1.	39
Tabell 4-3: Gjennomsnittlig effektfaktor ved lav og høy effekt i fase 1.	40
Tabell 4-4: Teoretiske verdier for effektfaktor PF ved lav og høy effekt i fase 1 basert på ligning (3).	40
Tabell 4-5: Spenningsubalanse ved et gjennomsnitt over ti minutter for ulike verdier av aktiv effekt.	41
Tabell 4-6: Harmoniske strømmer ved ulike nivåer av aktiv effekt i oppladningsmodus.	42
Tabell 4-7: Harmoniske strømmer ved forskjellige aktive effektnivåer i utladningsmodus.	42
Tabell 4-8: Gjennomsnittlige harmoniske forstyrrelser i strømkurven ved ulike effektnivåer i fase 1.	43
Tabell 4-9: Gjennomsnittlig effektfaktor ved ulike nivåer av aktiv effekt i fase 1.	44
Tabell 4-10: Gjennomsnittlig effektfaktor for alle faser ved ulike effektnivåer.	44
Tabell 4-11: THDi og effektfaktor for forskjellige nivåer av SOC og aktiv effekt ved oppladning.	45
Tabell 4-12: Verdier for THDi og effektfaktor for ulike nivåer av aktiv effekt og SOC ved utladning.	45
Tabell 4-13: Spenningsubalanse for ulike verdier av aktiv effekt i februar og april.	46
Tabell 4-14: THDi ved ulike nivåer av effekt for varmeste og kaldeste dag i april og februar.	48
Tabell 4-15: Effektfaktor i februar og april over et gjennomsnitt på ti minutter.	48

Figurliste:

Figur 2-1: Bidireksjonal lader bestående av filter, AC/DC omformer og DC/DC omformer. Figuren er laget med referanse til (Erb et al., 2010).	6
Figur 2-2: AC/DC omformer med IGBT transistorer. Figuren er utviklet med referanse til (Kesler et al., 2014) ..	7
Figur 2-3: Ideell og ikke-ideell halvbro DC/DC omformer. Figuren er laget med inspirasjon fra (Bayati et al., 2021).	8
Figur 2-4: Sinusformet spennings og strømcurve til elektrisk komponent med lineær belastning.	10
Figur 2-5: Nesten sinusformet spenningskurve og forvrengt sinusformet strømcurve.....	11
Figur 2-6: Sinusformede strømmer i fase 1, fase 2 og fase 3 som er 120 grader faseforskjøvet fra hverandre ...	12
Figur 3-1: Flytskjema som illustrerer de ulike delene av metodekapitlet.	25
Figur 3-2: Plassering av sikringskap på 400 V tilkoblet TN-S nettet i Fløy IV.	26
Figur 3-3: Skisse av måleoppsettet. Figuren er laget med inspirasjon fra (Casaleiro et al., 2021).....	28
Figur 3-4: Enfase og trefase oppkobling i et 400V TN nett. Figuren er laget med inspirasjon fra (Economics, 2019).	29
Figur 3-5: Oppladingsprofil med konstant strøm- konstant spenning. Figuren er laget med inspirasjon fra (Shen et al., 2012).	31
Figur 4-1: Linjespenning med og uten tilkoblet elbil.....	36
Figur 4-2: Fasespenning med og uten tilkoblet elbil.	36
Figur 4-3: Overharmoniske strømmer ved oppladning og utladning ved lav effekt	37
Figur 4-4: Overharmoniske strømmer i oppladnings og utladningsmodus ved høy effekt.....	38
Figur 4-5: Overharmoniske spenninger ved lav effekt i opp og utladningsmodus..	38
Figur 4-6: Overharmoniske spenninger i oppladnings og utladningsmodus ved høy effekt.....	39
Figur 4-7: Aktiv og reaktiv effekt ved oppladning og utladning av elbilen.....	41
Figur 4-8: THDi med tilkoblet elbil og endringer i aktiv effekt til venstre og uten tilkoblet elbil til høyre	43
Figur 4-9: Individuelle overharmoniske forstyrrelser ved utladning på 2,0 kW i februar og april.	47
Figur 4-10: Individuelle overharmoniske strømmer med oppladning på 6,0 kW i februar og april.....	47
Figur 8-1- Figur 8-8 : Linjespenning og effekt over tid i februar, mars og april med elbil tilkoblet	63
Figur 8-9- Figur 8-11: Linjespenning over tid uten elbil i mars	64
Figur 8-12- Figur 8-19: Fasespenning og effekt over tid februar, mars og april med elbil tilkoblet	65
Figur 8-20- Figur 8-22: Fasespenning over tid uten elbil i mars	66
Figur 8-23- Figur 8-30: Aktiv og reaktiv effekt over tid februar, mars og april med tilkoblet elbil	67

Figur 8-31- Figur 8-38: THDi og effekt over tid i februar, mars og april med elbil tilkoblet	69
Figur 8-39- Figur 8-41: THDi over tid uten elbil i mars	70

1. Innledning

I Norge øker elektrisitetsbehovet og belastningen på kraftnettet. Dette særlig fra integrering av en høyere andel elbiler i nettet (Spilde & Skotland, 2015). Antallet elektriske biler i Norge var på 689 169 biler ved utgangen av 2023. Elbiler utgjorde per 2023 tre fjerdedeler av nybilsalget i Norge (Pilskog & Bråthen, 2024). Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) anslår at tallet på elektriske biler kan øke til hele 1,5 millioner innen 2030 (Horne et al., 2019).

Smarte ladere kan benyttes for å unngå problemer med overbelastning i kraftnettet. Elbilene kan brukes fleksibelt ved at de lader på tidspunkt med små belastninger i nettet (Horne et al., 2019). Konseptet "Vehicle-to-Grid" (V2G) er en videreutvikling av smart ladeteknologi som muliggjør toveis strømflyt, hvor energi returneres til nettet fra elbiler. Studier viser at V2G kan forbedre spenningsprofilen i nettet (Taghizadeh et al., 2018; Tan et al., 2019; Yong et al., 2017). Med V2G kan man også lagre billig elektrisitet og utnytte den på et tidspunkt med høyere kostnader. På den måten er det mulig å motvirke overbelastning i nettet (Horne et al., 2019).

En viktig faktor i integreringen av V2G teknologi og andre elektriske komponenter i nettet er å sikre god spenningskvalitet. Spenningskvalitet er den elektriske energien sin kvalitet i kraftsystemet. Dårlig spenningskvalitet kan medføre slitasje og ødelegge elektriske apparater (Aabakken et al., 2018). NVE etablerte forskrift om leveringskvalitet (FOL) i 2004. Denne definerer terskelverdier for ulike parametere for spenningskvalitet (Lovdata, 2004). Disse verdiene belyses senere i oppgaven.

V2G-ladere har mulighet til å forbedre spenningskvaliteten ved å filtrere bort harmoniske forstyrrelser (Kusko & Thompsom, 2007; Reznik et al., 2013). Dersom ladere brukes under nominell effekt, kan det derimot introduseres nye harmoniske forstyrrelser. Det kan være nødvendig å benytte V2G-teknologi under nominelt effektnivå i kombinasjon med fornybare energikilder. Effekten fra V2G ladere må da tilpasses den variable produksjonen fra energikildene (Casaleiro et al., 2021).

I tillegg er det viktig å opprettholde god spenningskvalitet i nettet ved ulike temperaturer. Dette da klimaet i Norge er veldig varierende. Lave temperaturer kan medføre redusert ladekapasitet til elbilbatteriet, lavere effektfaktor samt dårligere spenningskvalitet i nettet (Aris & Shabani, 2017; Lucas et al., 2018; Trentadue et al., 2018). En studie viser at total harmonisk forvrengning i strøm (THDi) øker ved lave temperaturer (Lucas et al., 2018).

For å besvare utfordringer relatert til V2G, vil følgende problemstillinger undersøkes i denne masteroppgaven:

Overordnet problemstilling:

Hvordan påvirker opplading og utlading av en elbil med V2G- funksjonalitet spenningskvaliteten i nettet?

Delproblemstillinger:

1. Hvordan endres spenningskvaliteten ved opplading og utladning i forhold til spenningsvariasjoner, spenningsubalanse, harmoniske, THDi og effektfaktor?
2. Hvordan påvirkes spenningskvaliteten i nettet når ulike nivåer av aktiv effekt tilføres fra bilen og State of Charge (SOC) varierer?
3. Hvilken innvirkning har temperaturvariasjoner i et V2G system på effektfaktor og spenningskvaliteten i nettet?

I oppgaven videre gis det først en generell beskrivelse av lademetoder og teknologier, bidireksjonale ladere, belastninger og kraftsystemet, samt spenningskvalitetsparametere. Deretter diskuteres forskning og teori relatert til de tre problemstillingene i kapitlet om effekter ved tilkobling av V2G til nettet.

2. Teoretisk rammeverk

2.1 Lademetoder og teknologier for elbiler

Det finnes flere lademetoder og teknologier for elbiler. Kunnskap om disse metodene og teknologiene er viktig for å kunne utforske integrasjon av elbiler i strømmettet og for å vurdere påvirkningen deres på spenningskvaliteten. En forståelse av disse metodene kan bidra til utvikling av fremtidige løsninger og metoder for lading av elbiler, inkludert teknologier som V2G. Delkapitlene under tar for seg metoder som brukes til lading av elbiler i dag og teknologier som finnes for elbiler.

2.1.1 Lademetoder

Det eksisterer i dag flere lademetoder for elektriske biler i Norge. Lademetodene inkluderer standard lading, tidsstyrt lading, smart lading og V2G (Horne et al., 2019). Videre i denne oppgaven skal V2G settes søkelys på.

Mesteparten av de norske hjemmeladerne benytter standard ladning. Denne metoden fungerer slik at bilen trekker strøm når kjøretøyet kobles til. Elbilen slutter å lade enten når bilen kobles fra eller når batteriet er fulladet. Tidsstyrt lading virker ved at kjøretøyet starter å lade på et tidspunkt som er bestemt på forhånd (Horne et al., 2019).

For å unngå problemer med overbelastning i strømmettet kan smarte ladere benyttes. Smart lading innebærer automatisk styring av ladehastigheten, og kan for eksempel variere med kraftprisen. Store litiumionbatterier i elbiler er mulig å bruke fleksibelt ved at elbiler lades på tidspunkt med små belastninger i nettet. Det er også mulig å koordinere lading av flere elbiler. På den måten vil de fungere som en batterikapasitet og yte nettjenester som flaskehalshåndtering og frekvensregulering. Dette skaper robusthet i nettet (Horne et al., 2019).

Teknologien V2G er en videreutvikling av smart lading hvor energi føres tilbake igjen til strømnettet. V2G kan benyttes sammen med solceller som et batterilager for å maksimere elektrisitetsproduksjonen fra solcellepanelet. Den kan også benyttes som elektrisitetsstøtte til nettet. Dette kan være spesielt nyttig i tilfeller hvor hovedforsyningen svikter. V2G ladeteknologien er tilgjengelig i dag, men systemene er fremdeles komplekse og i utviklingsstadium. Det vil være nødvendig å optimalisere kapasitet og opp og utlading til hver elbil som tilknyttes nettet. Dette for at elbilintegrasjon skal lønne seg for kraftnett, tjenesteleverandører og elbileiere både økonomisk og teknisk (Horne et al., 2019).

2.1.2 Ladeteknologier

Lading av elbiler utføres vanligvis med vekselstrøm (AC) for normallading og likestrøm (DC) for hurtiglading. Effekten som tilføres bilbatteriet avgjør om ladingen gjøres med AC eller DC strøm. Lading med effekter opp til 43 kW utføres vanligvis med AC strøm. Ved normallading har bilen en ombordlader som konverterer AC fra nettet til DC for batteriet. Hurtiglading er lading som gjøres med DC strøm for effekter over 43 kW. Når en elbil hurtiglades befinner laderen seg i en ekstern lader utenfor bilen. Den eksterne laderen tilføres AC strøm fra nettet som laderen omformer til DC strøm for batteriet (Elbilgrossisten, 2024a).

Det eksisterer flere ulike støpsler eller plugger for lading av elbiler, og disse klassifiseres ofte etter «Type». Lading på en fase støttes av Type 1 standarden (J1772) og gir maksimal ladeeffekt på 7,4 kW. Biler produsert i Nord Amerika og Asia samt eldre biler bruker ofte denne standarden. Modeller som bruker Type 1 ladestandard inkluderer Kia Soul EV, Mitsubishi Outlander, PHEV og Nissan Leaf. Type 2 (IEC-62196) standard er utviklet for det europeiske strømnettet. Denne ladetypen støtter ladeeffekter opp til 43 kW. Type 2 standarden har tre ledere for lading på en fase og fem ledere for lading på tre faser. Europeiske biler støtter i hovedsak denne ladestandarden (Elbilgrossisten, 2024b).

Chademo en forkortelse på «charge de move» og kan oversettes til «lading på farten». Biler med Type 1 ladekontakt kan benytte seg av Chademo kontakt for hurtiglading. Chademo har mulighet til å levere opptil 100 kW DC effekt. Elektriske biler som kan benytte seg av Chademo støpselet inkluderer Nissan, Tesla, Subaru, Toyota, Peugeot, Mitsubishi, Mazda,

KIA og Honda. «Combined Charging System» (CCS) er en annen hurtigladestandard som ble utviklet av bilindustrien i Europa og Amerika. I Europa har bilene en ladekontakt med en kombinasjonsplugg i øvre del av Type 2 støpselet for å støtte CCS. Hurtigladingen tar rundt 30 minutter og laderen kan levere opptil 350 kW. Tesla Type 2 er en ladestandard utviklet av Tesla. Ladestandarden kan bruke Type 2 kontakten til både normallading (AC) og hurtiglading (DC). Tesla Model 3 er eksempel på en bil som bruker CCS ladekontakt og kan lade opptil 250 kW (Elbilgrossisten, 2024a).

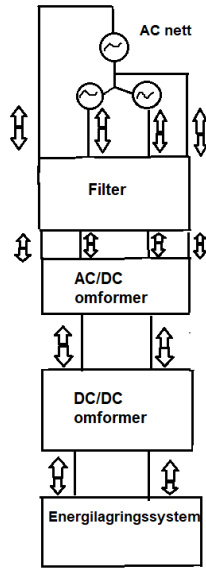
2.2 Bidireksjonale V2G ladere

Når elektriske kjøretøy utvikles, er konfigurasjonen til ladesystemet viktig for pålitelig opplading og utlading av batteriet til elbilen. Det er nødvendig med ladestrukturer og prosesser som medfører effektiv energioverføring mellom elbilen og nettet. Delkapitlene under ser på strukturen til ladesystemet, komponenter, effektivitet og betydningen av elbilens energilagringssystem i V2G systemet.

2.2.1 Ladestruktur

Laderen til en elbil med bidireksjonal funksjon består vanligvis av et filter, AC/DC omformer og DC/DC omformer. Når en elbil lades opp, går AC-strøm fra nettet gjennom et filter som fjerner uønskede frekvenskomponenter. Etterpå brukes en likeretter til å omforme vekselstrøm AC til likestrøm DC. DC spenningen fra AC/DC omformeren er for høy sammenlignet med DC spenningen i batteriet. Det er derfor behov for en DC/DC omformer for å få spenningen ned til et nivå som støttes av elbilbatteriet (Erb et al., 2010).

Utlading av elbilen gjøres med reversert prosess. DC strøm fra elbilens batteri går gjennom en DC/DC omformer. DC spenningen oppjusteres frem til ønsket spenningsnivå er nådd. Etterpå omformes DC strømmen til AC strøm ved hjelp av en vekselretter. Til slutt går AC strømmen gjennom et filter som jevner ut vekselstrømmen. Slik kan AC strømmen brukes videre i nettet. Figur 2-1 illustrerer en bidireksjonal lader koblet til AC nettet og et energilagringssystem. Energilagringssystemet i en bidireksjonal V2G lader er batteriet til elbilen (Erb et al., 2010).



Figur 2-1: Bidireksjonal lader i et trefasesystem bestående av et filter, AC/DC omformer og DC/DC omformer. Laderen er koblet til AC nettet og energilagringssystemet i elbilens batteri. Figuren er laget med inspirasjon fra (Erb et al., 2010).

2.2.2 Filter

I V2G systemer kan både aktive filtre og LCL-filtre brukes. Filtrene kan håndtere harmoniske forstyrrelser i strømmettet. Harmoniske forstyrrelser kan komme fra komponenter som forbruker strøm med ujevn belastning som for eksempel ladere eller datamaskiner (Kusko & Thompsom, 2007).

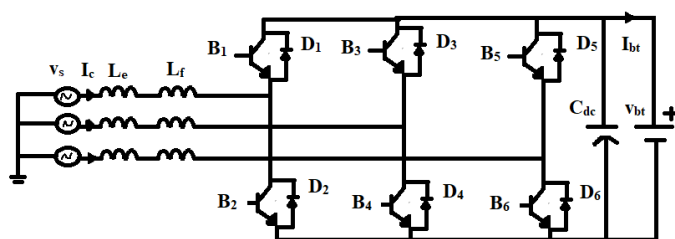
Aktive filtre fungerer ved å måle den ujevne strømmen fra kilden og senere produsere en motstrøm kalt kompensasjonsstrøm. Kompensasjonsstrømmen kansellerer harmoniske forstyrrelser i linjestrømmen. Mikrokontrolleren i AC/DC omformeren styrer aktiviteten til filteret ved å justere kompensasjonsstrømmen. Strømmen tilpasses på den måten harmoniske forstyrrelser som skal elimineres (Kusko & Thompsom, 2007).

LCL filtre består av induktanser L, kondensatorer C og en serie motstand for demping. Filteret befinner seg mellom AC/DC omformeren og strømmettet. Det brukes for å filtrere ut harmoniske forvrengninger som dannes av omformeren før strømmen går tilbake igjen til nettet (Reznik et al., 2013).

2.2.3 AC/DC og DC/DC omformere

En vanlig AC/DC-omformer i en V2G lader er en fullbro omformer. Denne består av seks IGBT transistorer, hvor to transistorer er koblet til hver fase i nettet (Kesler et al., 2014). Omformeren fungerer ved at to brytere slås på i positiv halvperiode og to brytere på i negativ halvperiode. Bryterdriftsforholdet styres for å regulere utgangsspenningen ved hjelp av pulsbreddemodulasjonskontroll (PWM kontroll). Nullintervaller ved PWM kontroll oppstår ved å slå av fire av transistorene. Når de fire transistorene er av, vil det resultere i null ledningstap på primærsiden i transformatoren. Dette som et resultat av at det ikke flyter strøm gjennom transistorene. På den måten fører PWM kontroll til lavere ledningstap (Mohan, 2012).

Toveis kraftflyt oppnås i omformeren ved å kombinere to transistorer som bytter med komplementære signaler, en med step-up (boost) og en med step-down (buck) funksjonalitet. Dermed kan helbromformeren fungere som både likeretter og vekselretter (Mohan, 2012). Komponenter som likerettere og vekselrettere i AC/DC omformere har optimal funksjon ved nominelt effektnivå. Harmonisk forvrengning kan introduseres ved lavere aktive effektnivåer (Casaleiro et al., 2021). Konfigurasjon av en AC/DC fullbro omformer kan ses fra Figur 2-2 under:

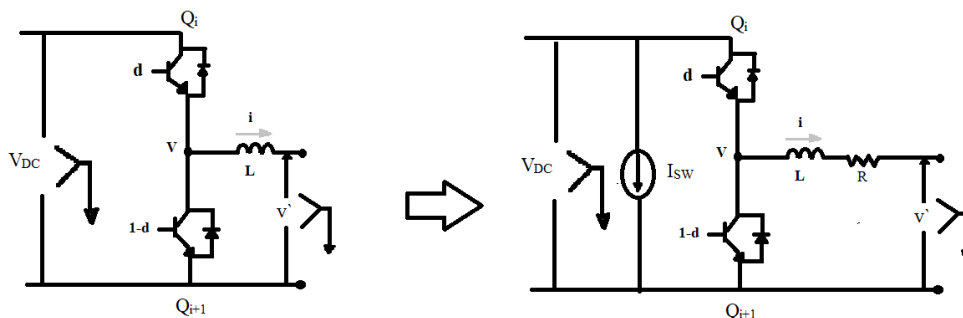


Figur 2-2: AC/DC omformer til en ekstern hurtiglader bestående av seks IGBT transistorer, hvor to er koblet til hver av de tre fasene i nettet. Omformeren er av typen fullbro omformer. Figuren er utviklet med referanse til (Kesler et al., 2014).

En mye brukt DC-DC omformer i kraftelektronikk er en ikke-isolert halvbro DC-DC omformer, kjent som IGBT-benet. Omformeren brukes iblant annet solcellepanel, vindturbiner, ladestasjoner og EV-batteriladere (Bayati et al., 2021).

Omformerens består av to IGBT transistorer plassert i halvbroen. Transistorene styres av en mikrokontroller for å kontrollere strømmen gjennom omformerens. Toveis kraftflyt oppnås ved å kombinere to transistorer med komplementære signaler. En transistor med step-up (boost) kombineres med en transistor med step-down (buck) funksjonalitet (Mohan, 2012).

I øvre del av de to kretsene i Figur 2-3 er det plassert en buck bryter og i nedre del en boost bryter. Kraftflyten i en boost bryter går fra en lavere DC-inngangsspenning til høyere utgangsspenning. I en buck bryter er kraftflyten motsatt, og går fra en høyere DC-inngangsspenning til en lavere utgangsspenning (Mohan, 2012). En ikke-ideell halvbro DC/DC omformer konstrueres i Figur 2-3 ved å legge til to komponenter til den ideelle omformerens. Komponentene er en motstand R og en uavhengig strømkilde I_{sw} . R er motstanden til IGBT under på tilstand ron koblet i serie med motstanden til en induktor L . Den uavhengige strømkilden I_{sw} kobles parallelt til V_{DC} spenningen (Bayati et al., 2021).



Figur 2-3: Ideell halvbro DC/DC omformer til venstre og ikke-ideell halvbro DC/DC omformer til høyre. Figuren er laget med inspirasjon fra (Bayati et al., 2021).

2.2.4 Effektivitet og tap i ladere

Høy energieffektivitet er ønskelig av flere årsaker. Disse inkluderer lavere driftskostnader på grunn av lavere andel bortkastet energi. Det vil også være mindre global oppvarming som et resultat av redusert behov for energiproduksjon. I tillegg trengs det mindre kjøling og dermed økes krafttettheten (Mohan, 2012).

Effektiviteten til EV-batteriladeren i lademodus kan ses som forholdet mellom utgangseffekt P_B og inngangseffekt P_t . Motsatt er tilfelle under utlading, hvor effektiviteten er forholdet mellom utgangseffekt P_t og inngangseffekt P_B . P_{con} og P_{sw} er tap som oppstår i systemet i form av ledningstap og svitsjetap. Uttrykkene for effektivitet under opplading og utlading kan ses fra følgende ligninger (1) og (2) (Bayati et al., 2021):

$$E_{lading} = \frac{P_B}{P_t} = \frac{P_t - P_{con} - P_{sw}}{P_t} \quad (1)$$

$$E_{utlading} = \frac{P_t}{P_B} = \frac{P_B - P_{con} - P_{sw}}{P_B} \quad (2)$$

Det er ønskelig å minimere svitsjetap og ledningstap for å oppnå høy energieffektivitet og redusere tap i ladere. Reduserte tap og høyere energieffektivitet kan oppnås gjennom bruk av elektriske komponenter med lave motstander. Spenning og frekvens kan også optimaliseres for dette formålet. Ledningstap kan reduseres ved bruk av en induktor med lav indre motstand. Svitsjetap kan minimeres gjennom å benytte IGBT-er med lavere spenning, omvendt elektrisk ladning og lavere koblingsfrekvens. Disse tiltakene er viktig for å minimere energitap i ladesystemer og for å oppnå høy effektivitet (Bayati et al., 2021).

2.2.5 Energilagringssystem

Energilagringssystemet i et V2G system er vanligvis et bilbatteri av typen lithiumionbatteri. Lithiumionbatteriet tilkobles V2G laderen. Et lithiumionbatteri består vanligvis av en negativ og positiv elektrode, elektrolytt, membran for passasje av litiumioner og batteriskall. Batteriet fungerer ved å flytte lithiumionene mellom positive og negative poler. Utlading foregår ved at litiumioner beveger seg fra negativ til positiv elektrode gjennom elektrolytten. Oppladning skjer i motsatt retning (Zhang et al., 2022).

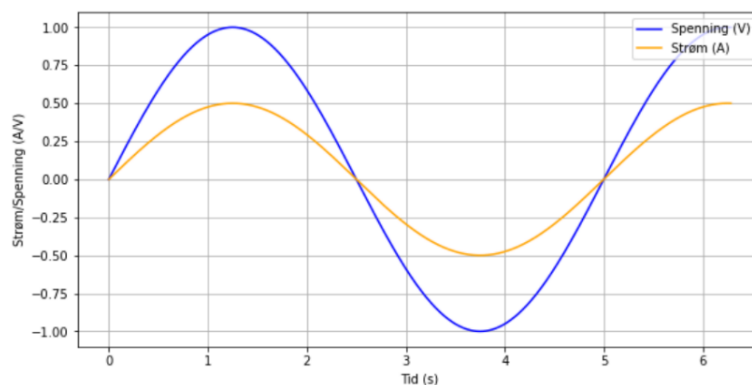
Lithiumionbatteriet påvirkes av utendørs temperaturendringer. Ujevn temperaturfordeling i batteripakken kan forårsake lokal nedbryting. Dette kan akselerere aldring og redusere batterilevetiden. Lave utendørs temperaturer kan også øke den indre motstanden i batteriet og medføre tap (Zhang et al., 2022).

2.3 Elektriske belastninger og kraftsystemet

I nettet finnes det lineære og ikke lineære belastninger. Forskjellen mellom belastningene ligger i kurveformen til strøm og spenning, samt deres påvirkning på stabiliteten og kvaliteten til nettet. Komponenter som likerettere og vekselrettere i ladere har ikke lineære karakteristikk som kan medføre harmoniske forstyrrelser i nettet. Det er ønskelig med et ideelt kraftsystem som er stabilt uten forstyrrelser. Delkapitlene under beskriver karakteristikken til lineære belastninger, ikke lineære belastninger og sammenhengen mellom THD og effektfaktor i ikke lineære belastninger, samt det ideelle kraftsystemet.

2.3.1 Lineære belastninger

Lineære belastninger har sinusformet spenning og strømcurve og medfører ikke forstyrrelser i nettet. Vanlige elektriske apparater er eksempler på lineære belastninger. Strøm og spenningskurve til en lineær belastning kan observeres fra Figur 2-4 (Electric, 2018).

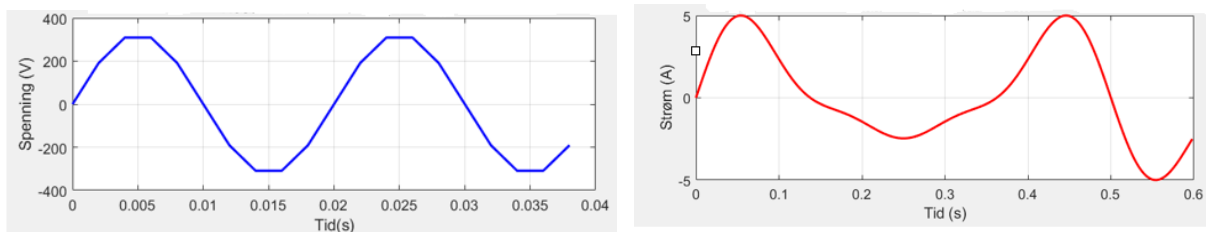


Figur 2-4: Sinusformet spennings og strømcurve til en elektrisk komponent med lineær belastning med tidsperiode på 2π sekunder.

2.3.2 Ikke lineære belastninger

Ikke lineære belastninger kan medføre forstyrrelser i kraftsystemet ved å danne harmoniske strømmer som forvrenger sinuskurven til strømmen. Dette kan medføre spenningsfall over impedanser og skape forstyrrelser i sinuskurven til spenningen. Ikke lineære belastninger finnes i informasjonsteknologiutstyr, industrielt utstyr, husholdningsutstyr og AC og DC-motorer med variabel hastighet. Introduksjon av harmoniske strømmer fra ikke lineære belastninger kan medføre effektivitetstap og funksjonsfeil (Electric, 2018).

Likerettere er en vanlig ikke lineær belastning i ladere. Kontroll av DC link kapasitoren er en metode for å minske harmoniske strømmer og THD i likerettere. Når kapasitoren holdes innenfor satte grenser reduseres rippelen i DC-bus spenningen. Dette gir jevnere strøm og mindre forstyrrelser (Mohan, 2012). Vekselrettere er en annen ikke lineær belastning i ladere som også kan medføre harmoniske forstyrrelser (Ahsan et al., 2021). I Figur 2-5 vises en spenningssinusbølge i Figur 2-5a som er nesten sinusformet, og en strømsinusurve Figur i 2-5b som forvrenges på grunn av harmoniske strømmer:



Figur 2-5: En nesten sinusformet spenningskurve med spenningsamplitude på 230 V og tidsperiode på 40 ms kan ses i Figur 2-5a. I Figur 2-5b observeres en forvrengt sinusformet strømkurve med strømamplitude på 5 A og tidsperiode på 600 ms. Strømkurven forvrenges på grunn av harmoniske strømmer.

Effektfaktor (PF) og THD er viktige mål for effektiviteten til ikke lineære belastninger. PF er forholdet mellom reel og tilsynelatende effekt, og THD måler forvrengning i strøm og spenningssignalet. Effektfaktoren reduseres når harmoniske strømmer og spenninger dannes. Dette kan medføre dårligere energikonvertering (Michalec et al., 2021). Sammenhengen mellom THD i strøm og spenning og effektfaktor kan observeres fra ligning (3) under. Her

inkluderes også forskyvningseffekt faktoren (DPF) for ikke lineære belastninger (Mohan, 2012):

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\%THD}{100}\right)^2}} \cdot DPF \quad (3)$$

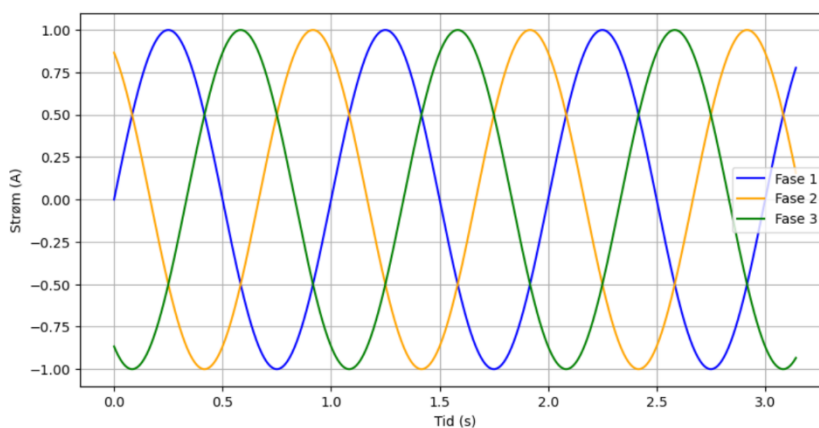
Effekt faktoren reduseres ved økning i THD. THD på 100% kan redusere effekt faktoren helt ned til 0,7 prosent ved en forskyvningsfaktor på 1 (Mohan, 2012).

2.3.1 Ideelt kraftsystem

Det er ønskelig med et ideelt trefasesystem uten forstyrrelser for å opprettholde et effektivt kraftsystem med minimale tap. I et ideelt kraftsystem har fasespenningene og strømmene sinusformede kurver som er balanserte og 120 grader faseforskjøvet fra hverandre.

Nøytralstrømmen er summen av de tre fasestrømmene og i et balansert system vil den være null (Kusko & Thompsom, 2007).

Grafisk fremstilling av de sinusformede fasestrømmene i et ideelt trefasesystem vises i Figur 2-6:



Figur 2-6: Sinusformede strømmer i fase 1, fase 2 og fase 3 som er 120 grader faseforskjøvet fra hverandre med amplitude på 1 og tidsperiode på π sekunder

2.4 Spenningskvalitet, standarder og sikkerhet

Spenningskvalitet betegnes som den elektriske energien sin kvalitet i kraftsystemet. Det er viktig at spenningen har god kvalitet for å kunne bruke den best mulig. Spenning med dårlig kvalitet kan medføre slitasje og ødeleggelse på elektriske apparater. Spenningskvalitet inngår som en del av leveringskvaliteten i kraftsystemet. Norges vassdrags og energidirektorat (NVE) satte en forskrift om leveringskvalitet (FOL) i 2004. Denne inkluderer grenseverdier til ulike parametere for spenningskvalitet (Aabakken et al., 2018). Definisjoner og verdier for spenningskvalitetsparametere gjeldende for kraftsystemet i Norge som er relevante for oppgaven beskrives videre i kapittelet. Det ses også på standarder og sikkerhet relatert til spenningskvalitet.

2.4.1 Langsomme variasjoner i spenningens effektverdi

Langsomme variasjoner i effektverdien til spenningen måles over ett minutt som et gjennomsnitt. Spenningens effektverdi (U_{rms}) skal ligge innenfor $\pm 10\%$ av det avtalte spenningsnivået. Et tilknytningspunkt i lavspenningsnett brukes for å måle effektverdien til spenningen. Det er nettselskapet som skal påse at spenningens effektverdi ligger innenfor gitte grenseverdier (Lovdata, 2004).

Spenningen i tilknytningspunktet skal være innenfor avtalt spenningsnivå i lavspenningsnett. I Norge er avtalt spenningsnivå 230 V i IT-nettet og 400 V i TN-nettet. Spenning over avtalt spenningsnivå kan medføre havari på elektrisk utstyr. Havarier oppstår som en konsekvens av at komponenter ikke tåler påkjenningen eller varmeutviklingen. Varmeutvikling kan i verste tilfelle medføre brann. En indikasjon på at spenningen ligger over avtalt spenningsnivå er at lyspærene skiftes ved jevnere mellomrom. Spenning under avtalt spenningsnivå kan resultere i feil i elektrisk utstyr, at elektrisk utstyr slutter å fungere eller havari. Lav spenning fører til at elektronisk utstyr overkompenserer ved å øke strømtrekket. Varmgang, lavere levetid og mer tap oppstår som et resultat av lav spenning og økt strømtrekk (Aabakken et al., 2018).

2.4.2 Spenningsusymmetri

Spenningsusymmetri er når fasevinkelen mellom linjespenningene eller effektverdiene til linjespenningene ikke er like. Fasene er 120 grader faseforskjøvet og har samme rms verdi i et trefasesystem. Et symmetrisk trefasesystem kan observeres fra Figur 2-6 (Aabakken et al., 2018).

Årsaker til spenningsusymmetri kan være at fasene har skjev fordeling av last eller at fasene har stor last. Fasebrudd, jordlutninger og kortslutninger av tofase kan også medføre spenningsusymmetri. Spenningsusymmetri har flere negative innvirkninger på kraftsystemet. Disse inkluderer tap som følge av strømbelastning i faser og spenningsfall. Usymmetri medfører også redusert levetid og ytelse for motorer, økning i temperatur og i verste fall havari. Kvaliteten på kraftelektronikk utstyr blir i tillegg dårligere som et resultat av usymmetri (Aabakken et al., 2018).

Spenningsusymmetri kan finnes ved å se på den positive og negative sekvenskomponenten til spenningen. Usymmetrien kan uttrykkes fra følgende ligning (4) (Aabakken et al., 2018):

$$\%U_{usymmetri} = \frac{U_-}{U_+} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 + 6\beta}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Hvor U_- er den negative negative sekvenskomponenten, U_+ er den positive sekvenskomponenten, $\%U_{usymmetri}$ er prosentvis grad av usymmetri, og β defineres fra ligning (5):

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} \quad (5)$$

Der U_{12} , U_{23} og U_{31} er linjespenningens grunnharmoniske komponent mellom henholdsvis fase 1 og 2, 2 og 3 og 3 og 1.

Spenningsusymmetri skal ikke overstige 2% gjennomsnittlig målt over ti minutter. Det er nettselskapet som påser at usymmetrien til spenningen i tilknytningspunktet ikke overstiger grenseverdien (Aabakken et al., 2018).

2.4.3 Harmoniske overspenninger og THD

Harmoniske overspenninger er sinusformede spenninger hvor frekvensen er et multiplum av forsyningsspenningens grunnharmoniske frekvens. Spenningen skal ideelt sett ha en ren sinuskurve med grunnharmonisk frekvens på 50Hz. Individuelle overharmoniske spenninger er spenninger med frekvens x ganger større enn 50 Hz. Sinuskurven blir forvrengt ved dannelse av overharmoniske spenninger. Individuell harmonisk forvrengning kan regnes ut fra følgende ligning (6):

$$\%U_h = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100\% \quad (6)$$

Hvor U_1 er den grunnharmoniske komponenten til spenningen, h er den harmoniske ordenen til komponenten, U_h er en harmonisk spenningskomponent og $\%U_h$ er prosentvis individuell harmonisk forvrengning (Aabakken et al., 2018).

Overharmoniske spenninger kan deles inn i like og odde harmoniske. Like harmoniske er et heltall antall ganger større enn den grunnharmoniske frekvensen, mens odde er et odde antall ganger større. Overharmoniske strømmer som danner overharmoniske spenninger, oppstår når utstyr kobles til kraftsystemet. Elektronisk utstyr, sveiseutstyr, likeretter/veksleretteranlegg og PC-er kan føre til overharmoniske spenninger. Konsekvenser av overharmoniske spenninger inkluderer elektrisk tap, samt redusert ytelse og overbelastning på motorer, transformatorer og generatorer (Aabakken et al., 2018).

Individuelle overharmoniske spenninger skal ligge innenfor gitte grenseverdier gjennomsnittlig over ti minutter. For nominell spenning mellom 230 V og 35 kV kan forskriftsatte grenser observeres fra Tabell 2-1:

Tabell 2-1: Forskriftssatte grenser for individuelle harmoniske spenninger med nominell spenning mellom 230 V og 35 kV (Lovdata, 2004).

Odde harmoniske				Like harmoniske	
Ikke multiplum av 3		Multiplum av 3			
Orden h	U _h	Orden h	U _h	Orden h	U _h
5	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	>9	0,5%	>4	0,5%
13	3,0%				
17	2,0%				
19, 23, 25	1,5%				
>25	1,0%				

Total harmonisk forvrengning (THD) er summen av rms-verdier til individuelle harmoniske frekvenser mot den grunnharmoniske komponenten. De individuelle harmoniske frekvensene er i orden 2 til 40. I henhold til FOL skal nettselskaper se til at THD holdes innenfor grenseverdiene. THD skal holdes innenfor et gjennomsnitt på 8% og 5%, over henholdsvis ti minutter og en uke. Verdiene gjelder for anlegg med nominell spenning mellom 230 V og 35 kV. THD av kurveformen til spenningskurven måles som 10- minutts gjennomsnittsverdier ved et eller flere målepunkter (Lovdata, 2004). Formel for THD for spenning kan uttrykkes ved ligning (7):

$$\%THDu = \frac{\sqrt{\sum_{2}^{40} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (7)$$

Hvor U₁ er den grunnharmoniske komponenten til spenningen, h er den harmoniske ordenen til komponenten, U_h er en harmonisk spenningskomponent og %THDu er prosentvis total harmonisk forvrengning (Aabakken et al., 2018).

2.4.4 Frekvens

Frekvensen i et system sier noe om balansen mellom produksjon og forbruk. Det skal produseres like mye som det forbrukes. Et avvik i frekvensen indikerer at forholdet mellom produksjon og forbruk er ulikt. Frekvensen stiger ved økt produksjon og synker ved økt forbruk. Endring i frekvens kan også oppstå som et resultat av høyere import eller eksport. I det nordiske synkronområdet er frekvensen lik (Aabakken et al., 2018).

Spennings frekvens skal holdes innenfor verdiene i den nordiske systemdriftsavtalen (Lovdata, 2004). Den nordiske systemdriftsavtalen fra 14. august 2019 definerer standard frekvensområde. Dette fastsettes som $50 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$ i det nordiske synkronområdet. Frekvensen i et elektrisk system skal ligge mellom 49,9 Hz og 50,1 Hz (TSOs, 2019).

2.4.5 Standarder

IEC 61000-3-12 er en internasjonal standard for å begrense harmoniske i strøm. Tabell 2-2 viser strømgrenser for harmoniske etter IEC 61000-3-12 standard (Wang et al., 2024).

Tabell 2-2: Harmoniske strømgrenser fra IEC 61000-3-12 internasjonal standard (Wang et al., 2024).

Harmonisk nummer n	Maksimalt tillatt harmonisk strøm A	Harmonisk nummer n	Maksimalt tillatt harmonisk strøm A
	Odde harmoniske		Like harmoniske
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq n \leq 40$	$0.23 * 8/n$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 * 15/n$		

Den vanligste metoden for å måle harmoniske i litteratur og standarder er total harmonisk forvrengning THD. THD i strøm THDi kan ses fra ligning (8) (Arghandeh et al., 2014):

$$THD_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (8)$$

Hvor I_1 er strømmens rms verdi for den fundamentale frekvensen, og I_h er magnituden av hver harmonisk komponent (Arghandeh et al., 2014).

2.4.6 Sikkerhet relatert til spenningskvalitet

Det er utarbeidet flere forskrifter knyttet til sikkerhet i kraftsystemet. I forskrift om leveringskvalitet (FOL) er det satt grenseverdier til spenningskvalitetsparametere. Disse er viktig å følge for å opprettholde et sikkert kraftsystem (Lovdata, 2004). Forskrift om forebyggende sikkerhet og beredskap i kraftforsyningen har som hensikt å sikre at kraftforsyningen opprettholdes i ekstraordinære situasjoner. I forskriften stilles det krav om at uønskede hendelser rapporteres, ekstraordinære situasjoner varsles, informasjonssikkerhet, at klassifiserte anlegg sikres, driftskontrollsystem beskyttes og til ressurser og reparasjonsberedskap (Lovdata, 2012).

Direktoratet for samfunnsikkerhet er ansvarlig for brannsikkerhet og elsikkerhet. Sikkerheten blir fulgt opp av forskrifter. Disse skal sikre bygging, prosjektering, drift og vedlikehold av elektriske anlegg. De elektriske anleggene skal ikke være til fare for helse, liv og materielle verdier (Aabakken et al., 2018). Forskriften som gjelder for lavspenning, er forskrift om elektriske lavspenningsanlegg (Lovdata, 1999).

Samlet sett skal forskriftene bidra til å opprettholde sikkerhet, helse, materielle verdier og liv i samfunnet.

2.5 Effekter ved tilknytning av V2G til distribusjonsnett

Dette kapittelet gir en gjennomgang av tidligere forskning og teori ved tilkobling av V2G til distribusjonsnett. Det inkluderer teori og studier relatert til de tre forskningsspørsmålene, samt reaktiv og aktiv effektkontroll. Delkapittelet tar for seg effekter ved opplading og utlading, effekter ved endring av State of Charge (SOC) og aktiv effekt, effekter ved temperaturvariasjoner og aktiv og reaktiv effektkontroll.

2.5.1 Effekter ved opplading og utlading

Det er mulig å benytte smarte ladere for å unngå problemer med overbelastning i nettet. Gjennom styring av ladehastigheten kan elbiler brukes fleksibelt og lade på tidspunkt med små belastninger i nettet. Opplading kan også styres i forhold til kraftprisen og dermed redusere ladekostnadene. I tillegg er det mulig å koordinere opplading av flere elbiler. Disse kan da fungere som et batteri. Smarte ladere skaper på den måten robusthet i nettet (Horne et al., 2019). Resultatene til en studie av Sørensen et al (2024) støtter dette ved å peke på at lading av elbiler i perioder med lav belastning kan redusere ladekostnadene og redusere topplasten i nettet (Sørensen et al., 2024).

Opplading av elektriske biler kan imidlertid føre til spenningsproblemer som fluktuasjoner og spenningsfall. Dette avhenger av nettverksegenskaper og ladefunksjoner. Enfaselading kan medføre ubalansert drift i systemet som kan føre til økte effekttap og bryte spenningsgrenser i systemet (Ahmadi et al., 2019). Simuleringsresultater fra Young et al (2015) viser at en økning i antall elektriske biler med rask opplading kan føre til brudd i sikkert driftsspenningsnivå (Yong et al., 2015).

Shahnia et al (2013) ser på spenningsubalanse i et lavspent distribusjonsnett for boliger under V2G funksjonalitet. Resultater fra studien tyder på at tilkobling av elektriske biler som opererer i V2G- modus til lavlastfasen i systemet kan øke spenningsubalansen. Dette spesielt på slutten av mateledningen (Shahnia et al., 2013). Farahani (2017) finner at koordinert opplading og utlading av elbiler og toveis kraftflyt kan være mulige virkemidler for å redusere ubalanseproblemer i nettet (Farahani, 2017).

Utlading av batteriet i V2G modus kan ha positive innvirkninger for nettet som for eksempel forbedring av spenningskvaliteten. Dette kan oppnås gjennom filtre i V2G-ladere. Både aktive filtre og LCL-filtre kan brukes til å filtrere ut harmoniske forvrengninger som dannes av omformerer i V2G ladere (Kusko & Thompsom, 2007; Reznik et al., 2013).

2.5.2 Effekter ved endring i aktiv effekt og SOC

«State of charge» (SOC) er et begrep som brukes ved opplading av elektriske kjøretøy. SOC sier noe om mengden gjenværende ladning i et batterilagringssystem. Det defineres som forholdet mellom tilgjengelig ladning og total batterikapazität. SOC er en nyttig indikator, men kan være vanskelig å måle nøyaktig. Årsaken er at SOC påvirkes av faktorer som batterialder, trykk, temperatur og kjemiske endringer i batteriet (Singh et al., 2023).

I Kütt et al (2013) har ulike nivåer av SOC blitt analysert ved bruk av elektriske ladere. Høyere THDi har blitt observert når batteriet nærmer seg full opplading og utgangseffekten til laderen synker. Altså når batteriet går fra å lade med konstant strøm til konstant spenning (Kütt et al., 2013).

Aktiv effektkontroll brukes ved opplading og utlading av batterier. I elbiler med lithium-ion-batterier er konstant strøm- konstant spenning en vanlig ladeteknikk. Oppladingen styres ved å regulere spenning og strøm gjennom prosessen (Bayati et al., 2021; Gao et al., 2019).

Flere forskningsartikler ser på bruk av aktiv effekt under nominelt nivå. V2G har potensiale til å muliggjøre høyere integrasjon av fornybar energiproduksjon. Dette kan kreve drift av elbilladere under nominelt nivå, fordi fornybare energikilder har variabel produksjon. Effekten fra V2G-ladere må tilpasses dette formålet (Casaleiro et al., 2021).

I artikkelen til Casaleiro et al (2021) ses det på tester utført på en 10 KW V2G- lader koblet til en Nissan Leaf 2015 modell. V2G-laderen opererer under ulike nivåer av aktiv effekt i oppladnings og utladningsmodus. Spenningskvaliteten ble vurdert ved å se på harmonisk forvrengning, effektfaktor og spenningsubalanse. Resultatene viser at spenningskvaliteten opprettholdes ved nominell effekt, men reduseres ved lavere effektverdier. Senking av relativ effekt førte til en økning i THDi og reduksjon i effektfaktor (Casaleiro et al., 2021). Resultater

for THDi og effektfaktor fra forsøket ble også sammenlignet med matematiske modeller utviklet for solcelleomformere som en funksjon av aktiv effekt (Elkholy, 2019; Rampinelli et al., 2015; Sidrach-de-Cardona & Carretero, 2005)

En lignende studie av Casaleiro et al (2020) konkluderte med at effektivitetsfaktor og effektivitet degraderer ved strømverdier under 50% av laderens nominelle kraft (Casaleiro et al., 2020).

2.5.3 Effekter ved temperaturvariasjoner

Innsikt i effektene av temperaturendringer er viktig for å kunne drifte V2G systemene på en sikker måte. Temperaturvariasjoner kan påvirke både laderen og elbilens batteri. Lave temperaturer kan øke den indre motstanden i batteriet. Dette fører til redusert batterikapasitet og kraftegenskaper. Ekstreme forhold kan føre til at elektrolytten fryser, noe som forhindrer batteriet fra å lades ut og bilen fra å starte (Zhang et al., 2022).

Lave temperaturer har også innvirkning på effektiviteten til lithiumionbatterier. Temperaturer under null grader kan medføre tap på grunn av redusert energi og kraftkapasiteter (Jaguemont et al., 2016). Videre kan ujevn temperaturfordeling i batteripakken forårsake lokal nedbryting. Dette kan akselerere aldring og redusere batterilevetiden (Zhang et al., 2022).

I tillegg kan lave temperaturer medføre tap i ladere. I ladere med IGBT omformere oppstår det tap i form av svitsjetap og ledningstap. Høyere svitsjetap og ledningstap skaper lavere effektivitet i systemet (Bayati et al., 2021).

Det har blitt undersøkt hvordan temperaturvariasjoner påvirker spenningskvaliteten i nettet i forbindelse med V2G-systemer. En studie utført av Lucas et al. (2018) undersøkte opplading av elektriske kjøretøy ved ulike temperaturer. Resultater viste at harmonisk forvrengning (THDi) økte ved lave temperaturer, når strømtrekket redusertes. Dette resulterte i flere elektriske kjøretøyer ute av drift ved -25 grader. Lave temperaturer medførte økt ladetid og dermed redusert ladekapasitet (Lucas et al., 2018).

I en annen studie av Trentadue et al (2018) ble effekten av temperatur på konverteringseffektiviteten under ladeprosessen undersøkt. Studien viste at lavere temperatur hadde negativ innvirkning på ladernes effektivitet. Konverteringseffektiviteten var lavest ved -25 grader på 39% og høyest ved 25 grader på 93%. Funnene indikerer at lave temperaturer kan medføre lavere effektivitet, lengre ladetid og redusert spenningskvalitet under ekstreme temperaturer (Trentadue et al., 2018).

Aris et al (2017) undersøkte driftsforholdene til en litiumioncelle i et batteri ved lave temperaturforhold. Det ble observert at batterikapasiteten ble redusert ved temperaturer under null når cellens indre motstand øktes. SOC ble redusert fra initiell 100% til 93%, 88% og 77% ved temperaturer på henholdsvis -5,-10 og -15 grader. Reduksjonen i batterikapasitet kan innvirke ladekapasiteten til elbilbatterier og dermed også spenningskvaliteten i nettet (Aris & Shabani, 2017).

2.5.4 Aktiv og reaktiv effektkontroll

Aktiv effektkontroll utføres ved å kontrollere strøm og spenning i DC/DC- omformeren under oppladning og utladning av et batteri. I et lithiumionbatteri som brukes i elbiler er konstant strøm-konstant spenning en vanlig ladealgoritme. Kontrollering under konstant strøm-konstant spenning fungerer ved at undersystemets batteristyring registrerer terminalspenningen til batteriet kontinuerlig, og sender referansekommandoer til kontrollsystemet. Dersom batterispenningen overstiger tillatt verdi, stoppes konstantstrømbølgeform og konstantspenningsbølgeform injiseres i stedet (Bayati et al., 2021).

Reaktiv effekt kontrolleres i AC/DC delen av kretsen. I denne delen av kretsen kontrolleres DC link spenningen, den reaktive effekten og nettstrømmen av mikrokontrolleren. Valget av referansekommando til DC-linkspenningen er viktig for å kunne optimalisere den reaktive utgangseffekten og redusere svitsjetap (Bayati et al., 2021; Monteiro et al., 2017).

I dagens bygninger er det en økende mengde ikke-lineære belastninger som krever mer reaktiv effekt fra strømmettet. Dette inkluderer elektroniske komponenter som ladere og PC-er (Electric, 2018). Studier av Taghizadeh et al (2018), Tan et al (2019) og Young et al (2017)

ser på aktiv og reaktiv effektkontroll i forbindelse med V2G ladere. Dette for å støtte nettet under opplading av elektriske kjøretøy.

Taghizadeh et al (2018) undersøkte bruken av en multifunksjonell elbil-lader som kan injisere reaktiv effekt fra DC-link kondensatoren til nettet. Resultatene viste forbedring av spenningsprofilen i urbane områder, men begrenset effektivitet i landlige områder på grunn av mer resistive strømfordelingssystemer (Taghizadeh et al., 2018).

Tan et al (2019) utviklet en multikontroll V2G-lader med aktiv og reaktiv effektkontroll for nettstøtte. De fant ut at laderen oppnådde høyest ladeeffektivitet i enhetseffektmodus. Operasjon i enhetseffektmodus kunne føre til et stort spenningsfall som brøt med nettspenningsgrensene. Spenningskontroll og injeksjon av reaktiv effekt ble brukt for å regulere spenningen og unngå nettspenningsfall (Tan et al., 2019).

Young et al (2017) utforsket en prototype for en elektrisk kjøretøylader med smart kontroll for støtte av strømmettet under opplading av elektriske kjøretøy. Resultater fra studien indikerte at injeksjon av reaktiv effekt opprettholdt DC-link-spenningen og holdt nettverksspenningen innenfor tillatt grenseområde. Dette uten negativ påvirkning på ladeprosessen (Yong et al., 2017).

2.5.5 Sammenfatning

Smarte ladere gjør det mulig med fleksibel opplading som baserer seg på nettbelastning og kraftpriser (Horne et al., 2019). Opplading av elbiler kan føre til spenningsproblemer, men V2G kan potensielt forbedre spenningskvaliteten gjennom bruk av aktive filtre og LCL filtre (Ahmadi et al., 2019; Kusko & Thompsom, 2007; Reznik et al., 2013). Resultater fra studier viser både positive og negative effekter på spenningsubalanse og nettstabilitet ved bruk av V2G (Farahani, 2017; Shahnian et al., 2013).

SOC brukes i forhold til batterikapazität. Det påvirkes av faktorer som kjemiske endringer og temperaturer (Singh et al., 2023). En tidligere studie analyserer ulike nivåer av SOC ved bruk av elektriske ladere. Resultatene viser en økning i THDi når batteriet begynner å nærme seg

full batterikapasitet. Dette når batteriet har gått over fra å lade med konstant strøm til konstant spenning (Kütt et al., 2013).

Aktiv effektkontroll kan støtte integrasjon av fornybar energi. Studier viser at spenningskvaliteten opprettholdes ved nominelt effektnivå, men kan reduseres ved lavere effektverdier. Reduksjon i effektverdier kan medføre økt total harmonisk forvrengning i strømmen (THDi) og redusert effektfaktor (Casaleiro et al., 2020; Casaleiro et al., 2021).

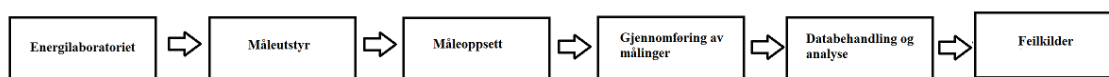
Temperaturvariasjoner påvirker effektiviteten til batteriet og laderen. Dette kan resultere i redusert kapasitet (Bayati et al., 2021; Zhang et al., 2022). Lavere temperaturer kan innvirke på spenningskvaliteten i nettet gjennom lengre ladetid og økt harmonisk forvrengning. Noe som kan påvirke stabiliteten til nettet (Aris & Shabani, 2017; Lucas et al., 2018; Trentadue et al., 2018).

V2G kan støtte nettet ved å injisere reaktiv effekt. Studier indikerer at smart kontroll av V2G ladere kan holde nettspenningen innenfor grenseverdiene. Dette uten at ladeprosessen blir påvirket negativt (Taghizadeh et al., 2018; Tan et al., 2019; Yong et al., 2017).

3. Materialer og Metode

Dette kapitlet tar for seg metoden som ble brukt for å undersøke spenningskvaliteten under opplading og utlading av en elbil i et forsøk. Forsøket ble gjennomført ved tilkobling av en Nissan Leaf til en bidireksjonal AC/DC lader. Relevant måleutstyr ble benyttet for å gjennomføre målingene.

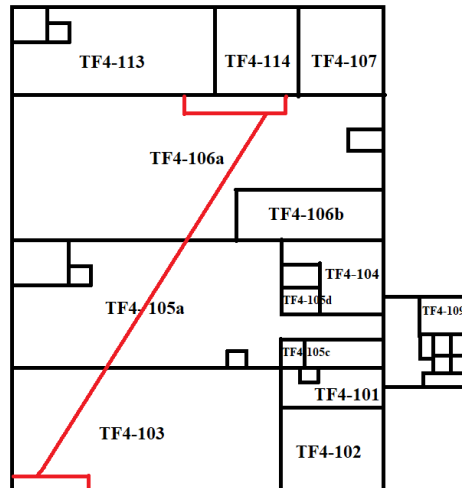
Metodedelen starter med å beskrive energilaboratoriet og de elektriske komponentene i kretsen. Deretter måleutstyr og oppsett av målingene. Senere blir gjennomføring av målingene samt datainnsamling og behandling diskutert. Til slutt presenteres beregninger som har blitt gjennomført samt feilkilder. En oversikt over de ulike delene i metodekapitlet kan observeres fra flytskjemaet i Figur 3-1 nedenfor:



Figur 3-1: Flytskjema som illustrerer de ulike delene av metodekapitlet. Kapitlet tar for seg elektriske komponenter i energilaboratoriet, måleutstyr i forsøket, oppsett til målinger, gjennomføring av målinger, databehandling og analyse og feilkilder.

3.1 Energilaboratoriet

Energilaboratoriet i Fløy IV ble benyttet i forsøket. Bilen og laderen var tilkoblet et sikringssskap av typen 400 V TN-S i rom TF4-106a. Videre var sikringssskapet koblet til et hovedskap i rom TF4-103 på 400 V TN-S. Begge sikringssskapene var tilkoblet en transformatorstasjon. Plasseringen av 400 V TN-S sikringssskapene i disse to rommene kan ses fra Figur 3-2 under:



Figur 3-2: Plassering av sikringsskap på 400 V tilkoblet TN-S nettet i Fløy IV. To sikringsskap er plassert i rom TF4-106a og rom TF4-103. Disse er markert som to røde firkanter koblet sammen med en rød strek.

3.1.1 Elektriske komponenter tilkoblet kretsen

Flere komponenter er tilkoblet de to sikringsskapene. Ikke-lineære belastninger som PC-er, 3d-printere og annet kontor- laboratorieutstyr er koblet til skapet i TF4-103. Det er også tilkoblet stikkontakter uten belastninger. Dette inkluderer to 32 A kontakter i rom TF4-103 og TF4-105a, samt et skap i laboratoriet i rom TF4-104. I sikringsskapet i TF4-106a er det tilkoblet en varmeovn på 9 kW og en pumpe på 0,37 kW fra rom TF4-114. Det antas at komponenter tilkoblet kretsen vil kunne påvirke spenningskvaliteten i bygget.

I dette forsøket er målepunktet plassert nær laderen og ikke direkte i sikringsskapet. Dette ble gjort for å fokusere målingene på effekten av laderen på spenningskvaliteten.

Strømforstyrrelser fra andre elektriske komponenter i kretsen antas å ha lavere innvirkning når målepunktet ikke er i sikringsskapet. For å ta høyde for dette usikkerhetsmomentet ble det gjort referansemålinger uten bilen tilkoblet. Dette for å isolere effekten av laderen og andre elektriske komponenter på spenningskvaliteten i bygget. Resultatene fra referansemålingene ble brukt som en baseline opp mot endringer som oppstod når elbilen ble tilkoblet.

3.2 Måleutstyr

Det ble brukt måleutstyr i form av en nettanalysator. Delkapitlet under beskriver nettanalysatoren og hvordan den ble benyttet i forsøket.

3.2.1 Nettanalysator

En nettanalysator av typen CA. 8333 Qualistar + ble benyttet fra Chauvin Group. Denne har tre spenningsinnganger og fire strøminnganger. Den kan kobles opp i enfase eller trefase avhengig av nettverket. Parametere som strøm, spenning, frekvens, harmoniske, THD, effekt og effektfaktor ble logget av nettanalysatoren i forsøket. Disse parameterne ble målt for å se på forstyrrelser i nettet ved opplading og utlading av en elbil, mot ulike nivåer av aktiv effekt og ved forskjellige temperaturnivåer (Arnoux, 2019).

3.3 Oppkobling av måleutstyr

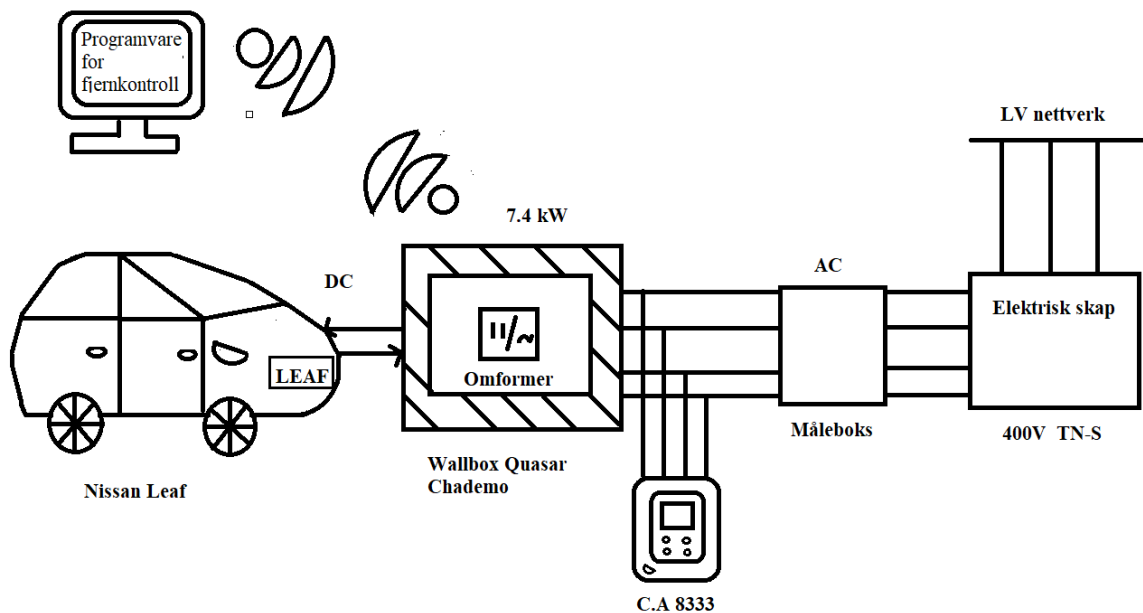
Forsøksoppsettet bestod av en elbil tilkoblet en bidireksjonal lader i en bygning. Det ble gjort målinger ved hjelp av et måleinstrument koblet til AC siden av kretsen. Delkapitlene under gir en detaljert beskrivelse av forsøksoppsettet samt en beskrivelse av hvordan laderen er koblet opp i nettverket.

3.3.1 Forsøksoppsett

Forsøket består av en elbil av typen Nissan Leaf. Bilen er koblet med en Chademo kontakt til en bidireksjonal AC/DC lader bestående av en DC/DC og AC/DC omformer. Denne er av typen enfaset Wallbox Quasar med en maksimal effekt på 7,4 KW (Wallbox, 2024). Videre er et måleinstrument av typen C.A. 8333 plassert mellom laderen og et 400 V TN-s elektrisk skap i rom TF4-106a. Måleinstrumentet måler AC strøm og spenning i alle tre faser og nøytralen (Arnoux, 2019). Eksternt installert på pc og app er en programvare som fjernkontrollerer laderen. I forsøket kontrolleres laderen for å injisere ulike nivåer av aktiv

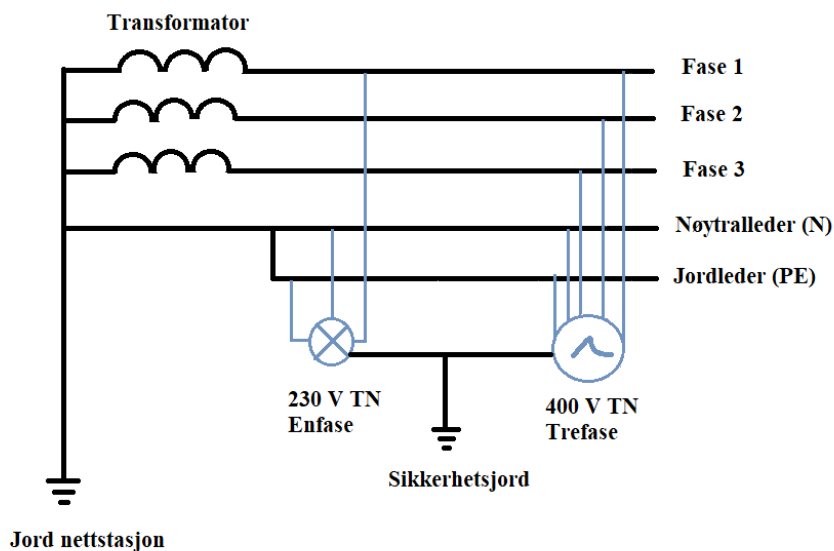
effekt fra bilbatteriet til nettet og fra nettet til bilbatteriet. Oppkoblingen i forsøket kan observeres fra Figur 3-3 under:

;



Figur 3-3: Skisse av måleoppsettet. En Nissan Leaf er koblet til en enfaset Wallbox Quasar 7,4 KW lader, et 400 V TN-S elektrisk skap og lavspennetnettet. Måleinstrumentet C.A 8333 er plassert mellom laderen og det elektriske skapet og måler AC strøm og spenning i alle tre faser og nøytralen. Installert eksternt på PC og app er en programvare for å kunne fjernkontrollere laderen. Figuren er laget med inspirasjon fra (Casaleiro et al., 2021).

I forsøket ble en enfaset lader koblet opp i et 400 V TN-S nett. Enfaset og trefaset oppkobling i 400 V TN nettet kan observeres fra Figur 3-4 nedenfor. For å hente ut 230 V fra systemet som gjøres ved enfaset oppkobling, brukes fasespenningen mellom en av fasene og nøytrallederen. Trefase 400V hentes ut ved å benytte linjespenningen mellom alle tre faser og nøytrallederen (Economics, 2019).



Figur 3-4: Enfase og trefase oppkobling i et 400V TN nett. Oppkobling i enfase vil gi spenning på 230 V, mens trefase gir spenning på 400 V. Figuren er laget med inspirasjon fra (Economics, 2019).

3.4 Gjennomføring av målinger

Målingene ble gjennomført ved å kalibrere måleutstyret, gjennomføre målinger i ulike perioder og endre parametere i måleperiodene. En beskrivelse av de forskjellige stegene ved gjennomføring av målingene blir gjort i delkapitlene under.

3.4.1 Kalibrering av måleutstyr

Ved tilkobling av instrumentet ble det observert uregelmessigheter i strømcurveformen. For å sikre at uregelmessighetene ikke kom fra feil i instrumentet, ble et annet måleinstrument brukt til sammenligning. En presisjonsstrømsensor med oscilloskop ble benyttet for å måle strømmen. Strømcurveformen var uregelmessig også i denne målingen. Dette bekreftet at uregelmessigheten var reell og ikke et resultat av feil i måleinstrumentet.

3.4.2 Måleperioder

Det ble gjennomført en måleperiode i februar, en i mars og en i april med bil tilkoblet til nettet. Målingene ble utført over en 13 timers periode på nattetid mellom klokken 19:30 og 08:30. Måleperioden ble satt til nattetid på grunn av tilgjengelighet på bil. Alle dataene ble logget av måleinstrumentet C.A 8333 med sekundsoppløsning i perioden. Referansemålinger ble gjort i mars uten elbil tilkoblet. Dette for å sammenligne forstyrrelser i nettet med og uten elbil. Programvaren Energinet ble benyttet for å sammenligne temperaturer i februar og april. Energinet er utviklet for avfalls, energi og miljørapportering. Programvaren kan brukes for å analysere energiforbruk, prognoser og avfallshåndtering (Kiona, 2024). Energinet for NMBU analyserer energibruk i bygg sett opp mot utendørstemperaturer. For å undersøke temperaturendringer i februar og april ble utendørstemperaturer for Fløy IV hentet ut fra Energinet. Gjennomsnittlige utendørstemperaturer ble anskaffet i de to månedene for tidspunkter da det ble gjort målinger.

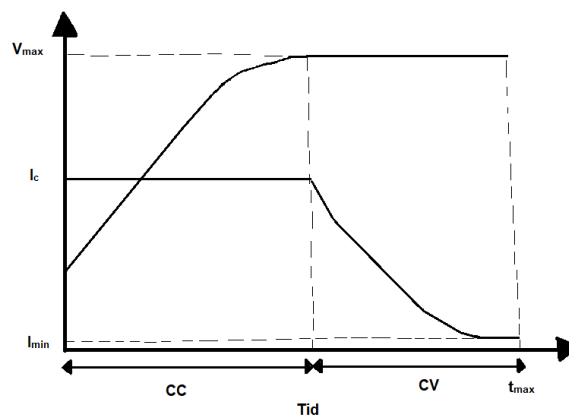
3.4.3 Endring i parametere

Under måleperioden ble ulike nivåer av aktiv effekt forhåndsconfigurert til tidsperioden mellom 19:30 og 08:30. Konfigurasjonen ble gjort i programvaren som fjernkontrollerer laderen. Det ble implementert en algoritme i batteristyringssystemet. Algoritmen ble programmert i mikrokontrolleren i DC/DC omformerer. Mikrokontrolleren kommuniserte videre med det overordnede kontrollsystemet ved å overføre kommandoer gjennom systemet (Bayati et al., 2021).

Oppladning og utladning av elbilbatteriet ble gjort ved å justere strømverdier fra elbilbatteriet i konstante tidsintervaller. Det ble benyttet en algoritme for konstant strøm- konstant spenning for å regulere opplading av batteriet. Under oppladningsprosessen registrerte undersystemets batteristyring terminalspenningen til batteriet kontinuerlig. Referansekommandoer ble sendt til kontrollsystemet. Dersom batterispenningen oversteg tillatt verdi, ble konstantstrømbølgeform stoppet og konstantspenningsbølgeform injisert i stedet (Bayati et al.,

2021). Ved utlading ble spenningen redusert og strømmen holdt konstant i forhold til utladningsprofilen til et lithiumionbatteri (Xue et al., 2014).

Aktiv effekt ble variert mellom 1,0 og 7,0 kW ved oppladning og mellom -1,0 og -7,0 kW ved utlading. Verdiene ble satt for ulike nivåer av aktiv effekt i forhold til maksimal effekt fra laderen på 7,4 kW. Den aktive effekten ble endret hver halvtime. Opplading og utlading ble planlagt etter de daglige prisene. Bilen ladet da det var billig og utladet da det var dyrt. SOC verdier ble lest av programvaren ved de ulike nivåene av aktiv effekt som ble injisert. Oppladning og utlading ble stanset ved 92 prosent SOC. Oppladningsprofil for konstant strøm-konstant spenning kan ses fra Figur 3-5 under:



Figur 3-5: Oppladingsprofil for et batteri med konstant strøm- konstant spenning. Strøm og spenning vises på y-aksen og tid på x-aksen. Batteriet starter å lade med konstant strøm frem til det når maksimal spenning. Deretter holdes spenningen konstant mens ladestrømmen reduseres. Figuren er laget med inspirasjon fra (Shen et al., 2012).

3.5 Databehandling og analyse

Databehandling og analyse ble gjennomført i flere steg. Disse inkluderer innsamling av data, bearbeiding av data og beregninger basert på de innsamlede dataene. En beskrivelse av de ulike stegene blir gjort i delkapitlene under.

3.5.1 Innsamling av data

Dataeksportprogramvaren PAT2 ble brukt for å overføre data fra C.A. 8333 til PC-en. Dataene ble lastet inn fra måleinstrumentet til PC-en ved hjelp av en USB-ledning. PAT2 overføringsprogramvaren definerer kommunikasjonshastigheten mellom PC-en og instrumentet ved tilkobling av USB ledningen. Dataen lastes inn fra måleinstrumentet til PC-en som Excel-filer (Arnoux, 2019).

3.5.2 Bearbeiding av data

Excelfiler med data fra målingene ble overført til Python ved bruk av pakker som pandas og matplotlib.pyplot. Videre ble relevante parametere plottet gjennom plotfunksjonene i Python. Det ble også overført excelfiler med data fra målingene til Matlab hvor harmoniske forstyrrelser ble plottet i et søylediagram. Excel ble benyttet til å finne gjennomsnittsverdier for ulike parametere som senere ble plottet inn i tabeller for ulike nivåer av aktiv effekt. Gjennomsnittsverdiene ble beregnet for tidsperioder på ti minutter. Det ble også regnet ut gjennomsnittsverdier over hele tidsperioden for enkelte parametere.

3.5.3 Beregninger

For å besvare den første problemstillingen om spenningskvalitet ved opp og utladning ble ulike analysemetoder brukt. Spenningsendringer ble visualisert ved å plote effekt og linjespenninger for bil mot linjespenninger uten bil i Python. Spenningsubalanse ble beregnet ved å anvende ligning (4) og (5) over en gjennomsnittlig periode på ti minutter (Aabakken et al., 2018). Videre ble harmoniske forstyrrelser undersøkt ved å plote totale overharmoniske strømmer og spenninger for alle tre faser i et søylediagram i Matlab over ti minutters perioder. Dette ble gjort for to ulike effektnivåer. THDi og effektfaktor ble også beregnet for ulike effektnivåer som et gjennomsnitt over hele tidsperioden. THDi ble beregnet for fase 1, mens effektfaktoren ble beregnet for både fase 1, teoretiske verdier og for alle fasene.

Den andre problemstillingen som fokuserer på spenningskvalitet ved endring i aktiv effekt og SOC ble besvart ved bruk av forskjellige metoder. Spenningsubalansen for ulike nivåer av aktiv effekt ble beregnet ved hjelp av ligning (4) og (5) over en ti minutters periode (Aabakken et al., 2018). Reaktiv effekt ble plottet mot aktiv effekt i Python. I tillegg ble harmoniske forstyrrelser analysert for ulike effektnivåer i fase 1 ved å beregne harmoniske strømmer over en ti minutters periode. Videre ble THDi visualisert ved å plote THDi og effekt med bil ved ulike effektnivåer mot THDi uten bil for fase 1 i Python. THDi og effektfaktor ble også beregnet som gjennomsnittsverdier over en ti minutters periode for ulike SOC og forskjellige nivåer av effekt i fase 1.

Ulike metoder ble benyttet for å besvare problemstilling tre som analyserer spenningskvalitet ved temperaturer i februar og april. Spenningsubalanse for kaldeste og varmeste dag i februar og april ble beregnet ved hjelp av ligning (4) og (5) over en ti minutters periode (Aabakken et al., 2018). Harmoniske strømmer ble også plottet i et søylediagram i Matlab for ulike harmoniske ordner ved effekter på 2 og 6 kW. Dette ble utført for kaldeste og varmeste dag i februar og april for alle fasene. Videre ble THDi og effektfaktor beregnet for ulike effektnivåer over en gjennomsnittlig periode på ti minutter for fase 1 på den kaldeste og varmeste dagen i februar og april.

3.6 Feilkilder

Det ble observert små strømmer i fase 2 og fase 3 ved oppkobling av bilen til nettet i enfase. Disse strømmene kan komme av ubalanse i systemet. Ubalanse kan oppstå ved tilkobling av et enfase apparat i et trefasesystem. Når det går strøm i alle tre faser i et enfaseapparat i et trefasesystem, kan dette føre til feil i målte strøm og effektverdier. Disse feilene kan resultere i feiltolkning av data og mindre pålitelige resultater. Et tiltak for å oppnå jevn fordeling av belastning i systemet, er å bruke trefase i stedet for enfaset lader (Skotland et al., 2016).

En annen feilkilde er at målingene kun ble utført på nattetid. Bygget kan ha andre nettforhold og belastningsprofiler ved ulike tidspunkt på dagtid sammenlignet med nattetid. Årsaken er at det er andre aktiviteter og forbruksmønstre i bygget på dagtid. Ideelt sett burde målingene vært utført både på dagtid og nattetid for å få et mer helhetlig bilde av spenningskvaliteten i bygget.

Ved utregning av gjennomsnittsverdier var det ulikt hvor mange data som var tilgjengelig for effektnivåene. Dette gir usikkerhet i målingene. Det ble også valgt perioder på ti minutter for gjennomsnittsverdier for parameterne. Andre perioder kunne muligens gitt verdier som avviker fra de som ble beregnet i dette forsøket.

4. Resultater

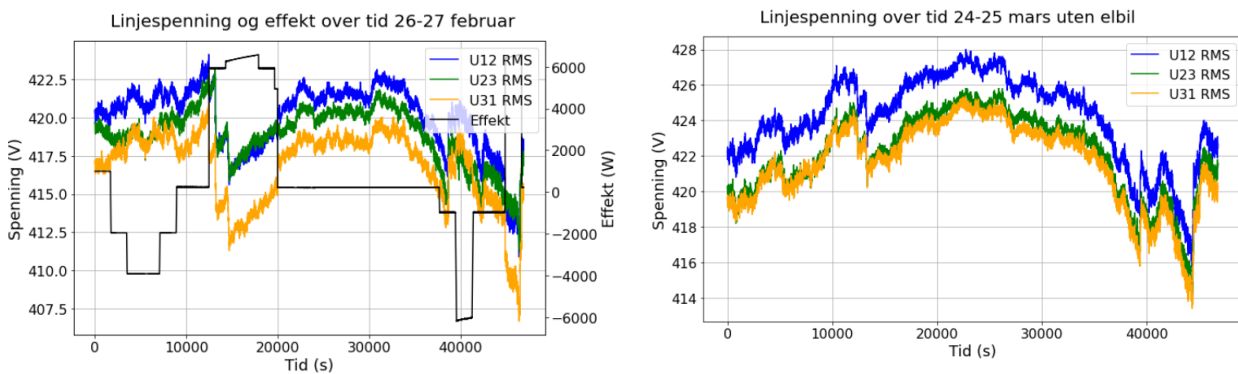
Dette kapitlet tar for seg resultater fra forsøket knyttet til de tre problemstillingene. Resultatene utforsker spenningskvalitet ved opplading og utlading, spenningskvalitet ved endring i aktiv effekt og SOC og spenningskvalitet ved temperaturvariasjoner.

4.1 Spenningskvalitet ved opplading og utlading

Delkapitlet under tar for seg ulike parametere for spenningskvalitet og sammenligner dem i opp og utladningsmodus. Parameterne som blir analysert er spenningsendringer, spenningsubalanse, harmoniske forstyrrelser, THDi og effektfaktor.

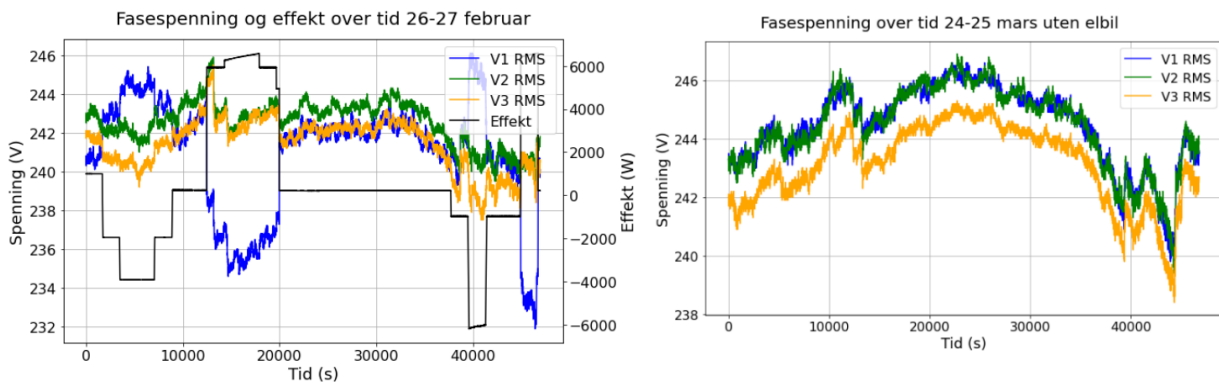
4.1.1 Spenningsendringer og spenningsubalanse

Linjespenninger med og uten elbil i Figur 4-1 holder seg innenfor grenseverdiene for langvarige spenninger i lavspenningsnettet. Det vil si i området ± 10 prosent av avtalt spenningsnivå på 400 V. I forbindelse med oppladning kan et spenningsfall observeres i Figur 4-1a. Ved utlading oppstår det en liten økning i spenningen, se Figur 4-1a. Fra Vedlegg A kan lignende trender fra resterende plott med bil observeres, samt spenninger innenfor referanseområdene for linjespenninger uten bil.



Figur 4-1: Figurene 4-1a og 4-1b viser linjespenning med og uten elbil tilkoblet lavspennetnettet. I Figur 4-1a er det mulig å observere positiv effekt ved oppladning og negativ effekt ved utladning samt de tre linjespenningene. Et spenningsfall kan ses i forbindelse med oppladning av elbilen. En liten økning i spenning oppstår ved utladning. Fra plottet i 4-1b kan de tre linjespenningene uten tilkoblet elbil observeres.

Figur 4-2 viser fasespenning med og uten tilkoblet elbil. Det kan observeres at spenningen i fase 1 hvor elbilen er tilkoblet faller ved oppladning og øker ved utladning. I de to andre fasene holder spenningen seg ganske stabil. Uten tilkoblet elbil er spenningene stabile i alle faser. Lignende trender for fasespenninger med og uten elbil kan observeres for målinger i Vedlegg B.



Figur 4-2: Figurene 4-2a og 4-2b viser fasespenning med og uten tilkoblet elbil. I fase 1 kan det observeres at spenningen faller ved opplading og øker ved utlading av elbilen. For fase 2 og 3 kan det ikke observeres noen store endringer ved opplading og utlading. Uten elbil holder fasespenningene seg stabile.

Nedenfor i Tabell 4-1 beregnes spenningsubalanse for elbilen ved opplading og utladning, samt uten elbilen tilkoblet. Utrekningene gjøres over et gjennomsnitt på ti minutter. Det kan observeres at spenningsubalansen er høyest i oppladningsmodus, lavere uten elbil og lavest i utladningsmodus.

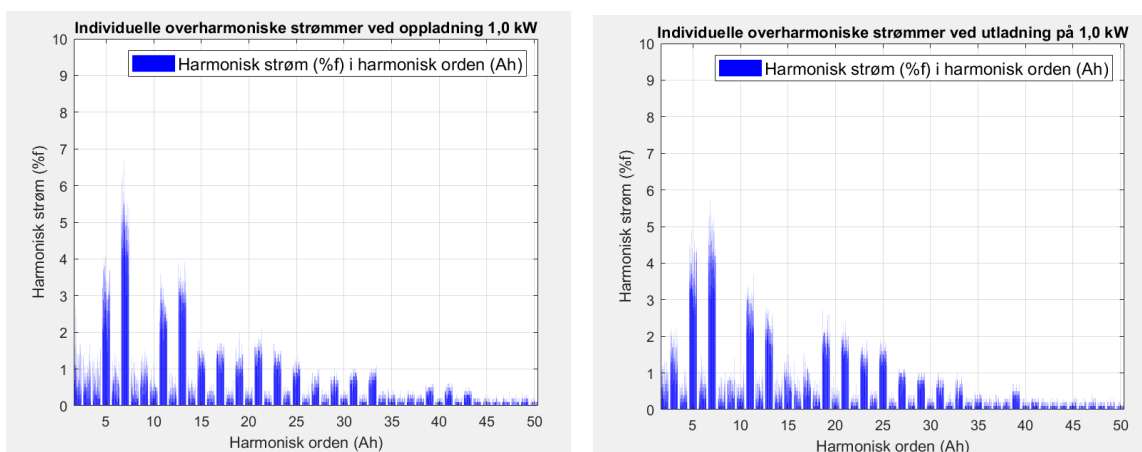
Tabell 4-1: Spenningsubalanse ved utladning, uten elbil og ved opplading. Det kan observeres lavest ubalanse ved utladning på 6 kW, høyere uten elbil og høyest ved opplading på 6 kW.

Effekt (kW)	-6,0	0	+6,0
Ubalanse %	0,08	0,32	0,57

4.1.2 Harmoniske, THDi og effektfaktor

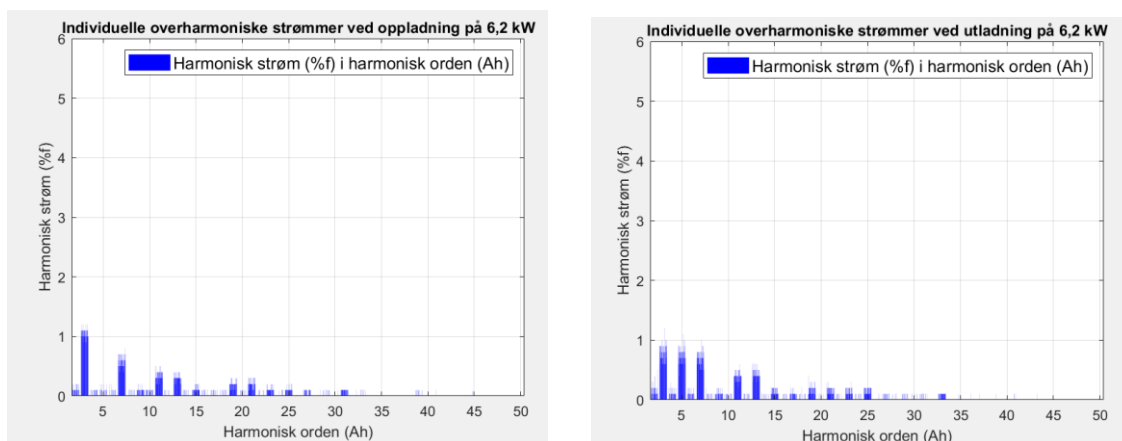
I figurene Figur 4-3, Figur 4-4, Figur 4-5 og Figur 4-6 nedenfor kan lignende harmoniske forstyrrelser i strømmer og spenninger observeres for både oppladning og utladning av elbilen.

Figur 4-3 viser harmoniske forstyrrelser i strømkurven ved oppladning og utladning ved lav effekt. Forstyrrelsene ses for ulike harmoniske ordener over en periode på ti minutter. Størst harmoniske forstyrrelser for begge moduser kan observeres ved odde harmoniske strømmer av 5, 7, 11 og 13 orden.



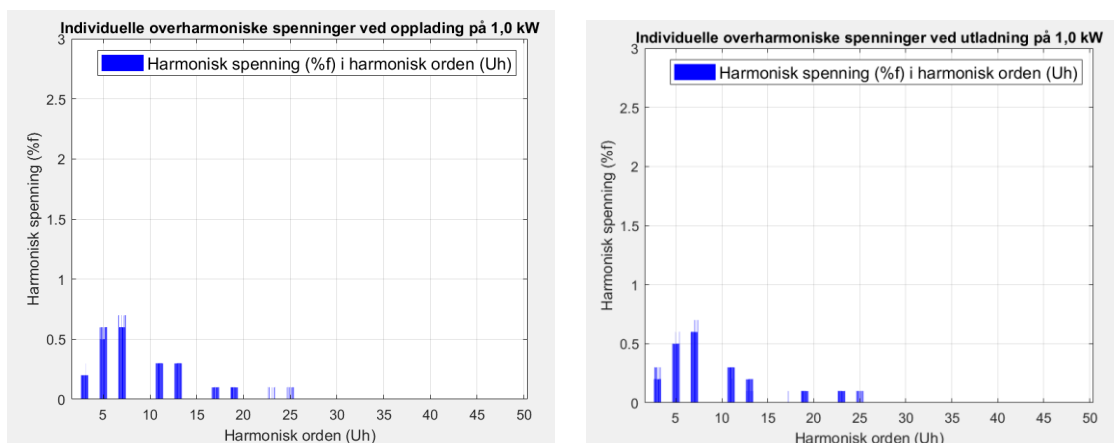
Figur 4-3: Overharmoniske strømmer ved oppladning og utladning ved lav effekt over en periode på ti minutter. De største forstyrrelsene observeres ved odde harmoniske strømmer av 5, 7, 11 og 13 orden i begge modusene.

Harmoniske forstyrrelser i strømkurven ved oppladning og utladning ved høy effekt vises i Figur 4-4. Forstyrrelsene ses over en periode på ti minutter. Små odde harmoniske strømmer kan observeres opp til orden 25 for begge lademodusene.



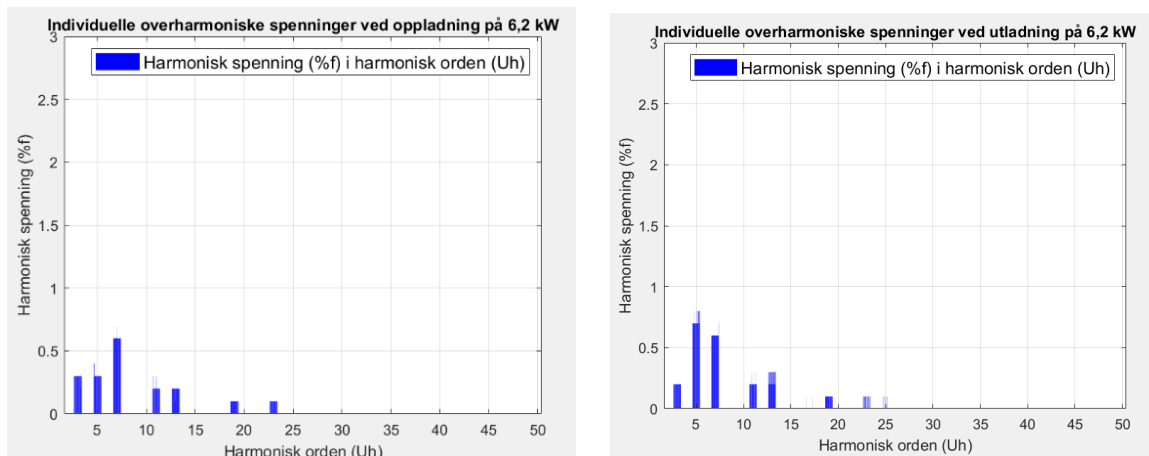
Figur 4-4: Overharmoniske strømmer i oppladnings og utladningsmodus. Strømmene plottes over en periode på ti minutter. For de to lademodusene kan små harmoniske forstyrrelser observeres opp til orden 25.

Fra Figur 4-5 kan overharmoniske spenninger for oppladning og utladning ved lav effekt ses. Dataene er plottet over en tidsperiode på ti minutter. Små odde harmoniske spenninger kan observeres opp til orden 25 for de to lademodusene.



Figur 4-5: Overharmoniske spenninger over en tidsperiode på ti minutter ved lav effekt i opp og utladningsmodus. Det kan observeres små odde harmoniske spenninger opp til orden 25 i begge moduser.

Figur 4-6 viser overharmoniske spenninger ved opp og utladning ved høy effekt. Dataene er plottet over en tidsperiode på ti minutter. Det er mulig å observere små harmoniske spenninger opp til orden 25 i begge moduser.



Figur 4-6: Overharmoniske spenninger i oppladnings og utladningsmodus over en tidsperiode på ti minutter. Effekten i begge moduser er høy. Det kan observeres små odde harmoniske spenninger opp til orden 25 ved både opp og utladning.

I Tabell 4-2 vises gjennomsnittlige harmoniske forstyrrelser i strømkurven ved lav og høy effekt for fase 1. Effekten er på 1,0 og 6,2 kW. Det kan observeres lignende forstyrrelser for de to effektnivåene.

Tabell 4-2: Gjennomsnittlige harmoniske forstyrrelser i strømkurven ved lav og høy effekt for fase 1. Det kan observeres lignende forstyrrelser for de to effektnivåene.

Effekt (kW)	±1,0	±6,2
THDi oppladning	8,01	1,39
THDi utladning	7,87	1,54

Gjennomsnittlige utregnede verdier for effektfaktor PF basert på lav og høy effekt i fase 1 kan observeres fra Tabell 4-3. Effektfaktoren er tilnærmet lik i oppladning og utladningsmodus for de to effektene.

Tabell 4-3: Gjennomsnittlig effektfaktor ved lav og høy effekt i fase 1. Det kan observeres at effektfaktoren er tilnærmet lik i opp og utladningsmodus for de to effektnivåene.

Effekt (kW)	±1,0	±6,2
PF oppladning	0,993	1
PF utladning	-0,993	-1

I Tabell 4-4 ses teoretiske verdier for effektfaktor i fase 1 ved lav og høy effekt. Den teoretiske effektfaktoren er lignende i begge moduser.

Tabell 4-4: Teoretiske verdier for effektfaktor PF ved lav og høy effekt i fase 1 basert på ligning (3). Effektfaktoren er lignende i både opp og utladningsmodus.

Effekt (kW)	±1,0	±6,2
PF oppladning	0,9994	1
PF utladning	-0,994	-1

4.2 Spenningskvalitet ved endring i aktiv effekt og SOC

Delkapitlet ser først på endringer i spenningskvaliteten ved nivåer av aktiv effekt mellom 1,0 kW og 6,2 kW i oppladnings og utladningsmodus. Parametere som spenningsubalanse, reaktiv effekt, harmoniske og THDi analyseres. Senere observeres endringer i parameterne THDi og effektfaktor ved endringer i SOC.

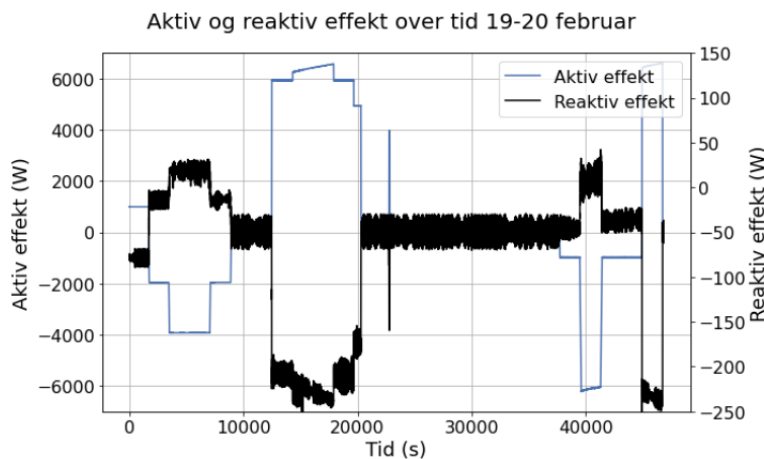
4.2.1 Spenningsubalanse og reaktiv effekt ved aktive effektnivåer

Tabell 4-5 viser spenningsubalanse ved opp og utlading av en elbil for ulike nivåer av aktiv effekt. Det kan observeres høyere spenningsubalansen for oppladning sammenlignet med utladning for alle effektnivåer. I tillegg kan redusert ubalanse under oppladning ved lavere effektverdier ses. Motsatt er tilfelle ved utladning hvor ubalansen øker når effektverdiene reduseres.

Tabell 4-5: Spenningsubalanse ved et gjennomsnitt over ti minutter for ulike verdier av aktiv effekt. Det er mulig å observere at spenningsubalansen er høyere ved oppladning sammenlignet med utladning for alle verdier av aktiv effekt.

Effekt (kW)	±1,0	±3,0	±6,0	±6,2
Ubalanse oppladning	0,32%	0,41%	0,57%	0,50%
Ubalanse utladning	0,29%	0,32%	0,08%	0,08%

Fra Figur 4-7 kan aktiv og reaktiv effekt ved oppladning og utladning av elbilen ses. Det kan observeres en reduksjon i reaktiv effekt ved oppladning og økning ved utladning for forskjellige aktive effektnivåer. Dermed er den reaktive effektkurven speilvendt i forhold til den aktive. Lignende resultater fra flere dager med tilkoblet elbil kan observeres fra Vedlegg C.



Figur 4-7: Aktiv og reaktiv effekt ved oppladning og utladning av elbilen. Det kan observeres at reaktiv effekt reduseres ved oppladning og øker ved utladning for ulike nivåer av aktiv effekt. Den reaktive effektkurven er speilvendt i forhold til den aktive.

4.2.2 Harmoniske, THDi og effektfaktor ved forandring i aktiv effekt

I Tabell 4-6 vises harmoniske forstyrrelser i strøm (%f) ved aktive effektnivåer mellom 1,0 og 6,2 kW i oppladningsmodus i fase 1. Økning i harmoniske forstyrrelser kan observeres ved reduksjon i aktiv effekt. Dataene er utregnet over et gjennomsnitt på ti minutter. Markert i svart undertekst er de verdiene som avviker fra grenseverdiene oppgitt i Tabell 2-2.

Tabell 4-6: Harmoniske strømmer ved ulike nivåer av aktiv effekt i oppladningsmodus. Forstyrrelsene plottes over et gjennomsnitt på ti minutter for fase 1. Det kan observeres en økning i harmoniske forstyrrelser ved reduksjon i aktiv effekt.

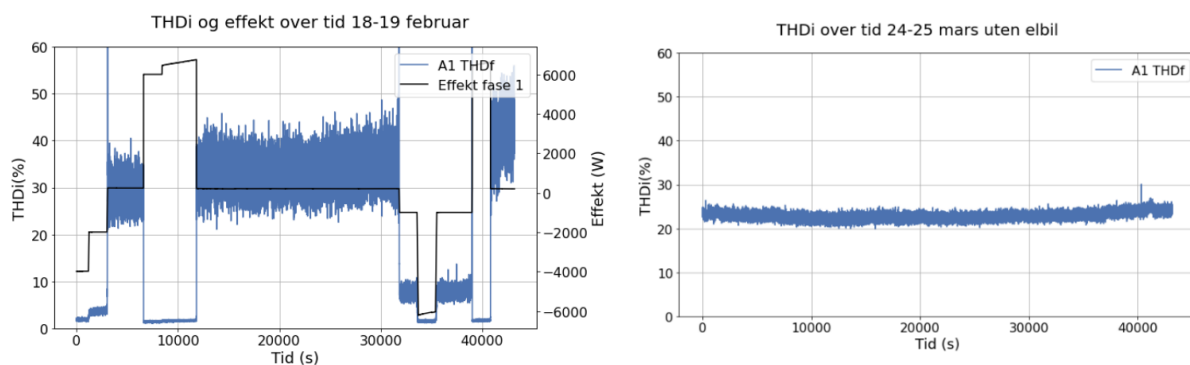
Harmonisk orden (Ah)							
Oppladning (kW)	3	5	7	9	11	13	15
1,0	0,68	<u>2,89</u>	<u>4,65</u>	<u>0,83</u>	<u>2,55</u>	<u>3,00</u>	<u>1,19</u>
3,0	0,40	0,90	<u>1,33</u>	0,30	<u>0,86</u>	<u>0,90</u>	<u>0,27</u>
6,0	0,99	0,19	0,60	0,13	<u>0,45</u>	<u>0,44</u>	0,14
6,2	1,06	0,05	0,60	0,08	<u>0,36</u>	<u>0,31</u>	0,10

Tabell 4-7 viser harmoniske forstyrrelser (%f) i strøm for effekter mellom 1,0 og 6,2 kW i utladningsmodus i fase 1. En økning i harmoniske forstyrrelser kan ses ved reduserte effektverdier. Tallene er beregnet over et gjennomsnitt på ti minutter. Verdiene som avviker fra grenseverdiene i Tabell 2-2 er markert i svart undertekst.

Tabell 4-7: Harmoniske strømmer ved forskjellige aktive effektnivåer i utladningsmodus. Dataene plottes som et gjennomsnitt over ti minutter for fase 1. En økning i harmoniske forstyrrelser kan observeres når den aktive effekten reduseres.

Harmonisk orden (Ah)							
Utladning (kW)	3	5	7	9	11	13	15
1,0	1,46	<u>3,59</u>	<u>4,15</u>	<u>0,60</u>	<u>2,56</u>	<u>2,14</u>	<u>0,68</u>
3,0	0,91	<u>1,44</u>	<u>1,45</u>	0,27	<u>0,85</u>	<u>0,94</u>	<u>0,33</u>
6,0	0,98	0,08	0,65	0,07	<u>0,37</u>	<u>0,34</u>	0,05
6,2	0,78	0,79	0,71	0,09	<u>0,41</u>	<u>0,44</u>	0,13

Fra Figur 4-8 kan effekt og THDi for en elbil tilkoblet nettet ses i Figur 4-8a. Figur 4-8b viser THDi uten tilkoblet elbil. Høye forstyrrelser kan observeres i Figur 4-8a i strømmen når bilen er tilkoblet og hverken lader eller utlader. Tilkobling av elbilen medfører lave forstyrrelser ved opplading og utladning ved nominell effekt. Reduksjon i effekt gir økte THDi verdier. Uten elbil kan det observeres høye forstyrrelser i strømmen fra Figur 4-8b. Lignende resultater fra flere dager med og uten elbil kan observeres fra Vedlegg C.



Figur 4-8: THDi med tilkoblet elbil og endringer i aktiv effekt til venstre i Figur 4-8a og uten tilkoblet elbil til høyre i Figur 4-8b. Fra plottet i 4-8a kan det observeres høye forstyrrelser når bilen er tilkoblet og hverken opplades eller utlades. Disse forstyrrelsene er større enn forstyrrelsene når elbilen ikke er tilkoblet, som kan ses fra Figur 4-8b. Ved endringer i aktiv effekt er THDi verdiene lavest under nominell effekt og øker ved reduksjon i aktiv effekt. Dette kan observeres fra Figur 4-8a.

Tabell 4-8 viser gjennomsnittlige harmoniske forstyrrelser i strømkurven ved ulike effektnivåer for fase 1 ved bil tilkoblet. Effekten strekker seg mellom 1,0 og 6,2 kW. Det kan observeres en prosentvis økning i harmoniske forstyrrelser i strømsignalet ved reduserte effekter for opp og utladning.

Tabell 4-8: Gjennomsnittlige harmoniske forstyrrelser i strømkurven ved ulike effektnivåer i fase 1. Det kan observeres en økning i harmoniske forstyrrelsene ved oppladning og utladning ved reduksjon i effekt.

Effekt (kW)	±1,0	±3,0	±6,0	±6,2
THDi % oppladning	8,01	2,33	1,44	1,39
THDi % utladning	7,87	2,83	1,54	1,54

Gjennomsnittlige utregnede verdier for effektfaktor PF basert på ulike aktive effektnivåer for fase 1 kan ses i Tabell 4-9. Det kan observeres at effektfaktoren reduseres noe i både oppladning og utladningsmodus ved reduserte effekter.

Tabell 4-9: Gjennomsnittlig effektfaktor ved ulike nivåer av aktiv effekt i fase 1. Det kan observeres at effektfaktoren reduseres noe ved lavere effektnivåer ved både opp og utladning.

Effekt (kW)	±1,0	±3,0	±6,0	±6,2
PF oppladning	0,993	0,999	1	1
PF utladning	-0,993	-0,999	-1	-1

I Tabell 4-10 ses gjennomsnittlige verdier for effektfaktor i alle faser. Effektfaktoren holder seg stabil i oppladningsmodus, men reduseres noe ved oppladning på 1,0 kW. I utladningsmodus holder effektfaktoren seg ganske stabil ved ulike aktive effekter. Det kan observeres en økning ved utladning på 1,0 kW.

Tabell 4-10: Gjennomsnittlig effektfaktor for alle faser ved ulike effektnivåer. Effektfaktoren er stabil ved reduserte effekter i oppladningsmodus, men reduseres noe ved oppladning på 1,0 kW. I utladningsmodus holder effektfaktoren seg ganske stabil. Det er mulig å observere en økning ved utladning på 1,0 kW.

Effekt (kW)	±1,0	±3,0	±6,0	±6,2
PF oppladning	0,955	0,964	0,962	0,960
PF utladning	-0,984	-0,966	-0,965	-0,966

4.2.3 THDi og effektfaktor ved endring i SOC

Under i Tabell 4-11 vises THD og effektfaktor for forskjellige nivåer av SOC og aktiv effekt ved oppladning. Beregningene er gjort over et gjennomsnitt på ti minutter. En liten reduksjon i THDi ved høyere SOC kan observeres fra tabellen, samt en liten økning når SOC nærmer seg 100 prosent. Effektfaktoren holder seg stabil ved forskjellige nivåene av SOC. Både THDi og effektfaktor reduseres ved reduserte effektnivå.

Tabell 4-11: THDi og effektfaktor for forskjellige nivåer av SOC og aktiv effekt ved oppladning. Verdiene er beregnet over et gjennomsnitt på ti minutter. Det kan observeres en liten reduksjon i THDi ved høyere SOC. Når SOC nærmer seg 100 prosent, kan det observeres en liten økning i THDi igjen. Effektfaktoren er stabil for de ulike nivåene av SOC. Det kan observeres en reduksjon i THDi og effektfaktor ved reduserte nivåer av effekt.

Oppladning (kW)	SOC	THDi	PF
1,0	75	8,3	0,993
	85	7,73	0,993
6,0	60	1,5	1
	81	1,42	1
	90	1,48	1

Tabell 4-12 viser verdier for THDi og effektfaktor ved endringer i effekt og SOC ved utladning. Verdiene beregnes over et gjennomsnitt på ti minutter ved utladning. Fra tabellen kan det observeres at en endring i SOC fra 90 til 60 prosent medfører varierende verdier av THDi. Effektfaktoren er stabil ved endringer i SOC for de ulike effektnivåene.

Tabell 4-12: Verdier for THDi og effektfaktor for ulike nivåer av aktiv effekt og SOC ved utladning. THDi og effektfaktor er beregnet for et gjennomsnitt over ti minutter. Det kan observeres varierende verdier av THDi ved endringer i SOC. Effektfaktoren holder seg stabil ved endring i SOC for de ulike effektnivåene.

Utladning (kW)	SOC	THDi	PF
-1,0	66	7,3	-0,994
	76	8,4	-0,993
	91	6,6	-0,994
-2,0	63	3,77	-0,998
	75	4,1	-0,998
	85	4,1	-0,998
-4,0	58	2,06	-0,999
	71	2,25	-0,999
	81	2,16	-0,999

4.3 Spenningskvalitet ved temperaturvariasjoner

Dette delkapitlet ser på ulike parametere for spenningskvalitet ved endringer i temperaturer i februar og april. Gjennomsnittlig temperaturforskjell er på 7,6 grader mellom kaldeste og varmeste dag. Parameterne som undersøkes er spenningsubalanse, harmoniske forstyrrelser, THDi og effektfaktor.

4.3.1 Spenningsubalanse

I Tabell 4-13 vises spenningsubalanse den kaldeste og varmeste dagen for en elbil tilkoblet en bygning. Det kan observeres at spenningsubalansen er noe høyere i februar for de ulike nivåene av aktiv effekt.

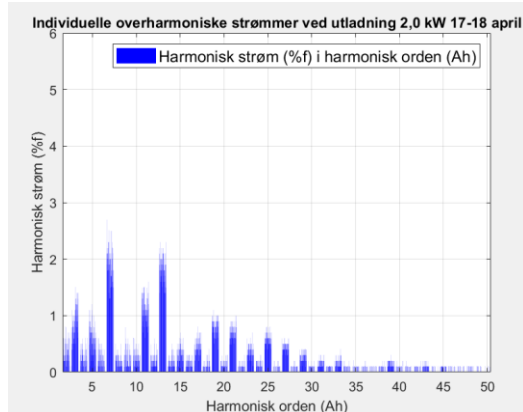
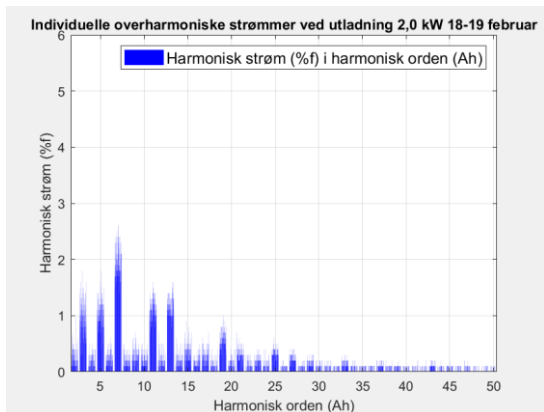
Tabell 4-13: Spenningsubalanse ved et gjennomsnitt over ti minutter for ulike verdier av aktiv effekt i februar og april. Det kan observeres at spenningsubalansen er noe høyere ved lavere temperaturer i februar.

Effekt (kW)	-2,0	-4,0	+6,0
Ubalanse 18-19 februar	0,31%	0,29%	0,54%
Ubalanse 17-18 april	0,23%	0,25%	0,44%

4.3.2 Harmoniske, THDi og effektfaktor

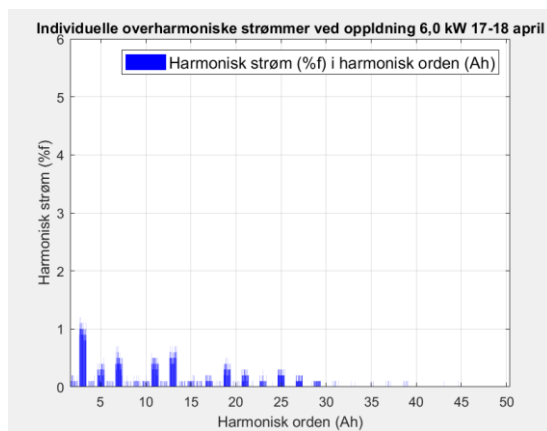
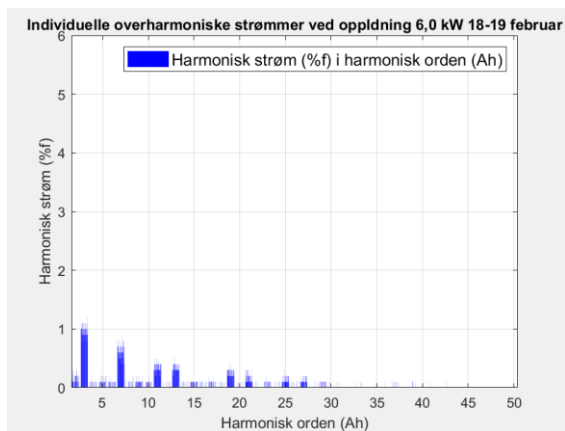
Figur 4-9 viser individuelle overharmoniske strømmer ved utladning på 2,0 kW kaldeste dag i februar og varmeste dag i april. Dataene er plottet over et gjennomsnitt på ti minutter.

Forstyrrelsene er lignende for begge dager.



Figur 4-9: Individuelle overharmoniske forstyrrelser ved utladning på 2,0 kW for kaldeste og varmeste dag i februar og april. Verdiene er plottet over et gjennomsnitt på ti minutter. Ingen tydelig forbedring kan se for harmoniske i april i forhold til februar.

I Figur 4-10 ses overharmoniske strømmer ved oppladning på 6,0 kW for et gjennomsnitt over ti minutter. Den kaldeste dagen i februar sammenlignes med den varmeste dagen i april. Minimale forskjeller i forstyrrelser kan observeres for de to dagene.



Figur 4-10: Individuelle overharmoniske strømmer med oppladning på 6,0 kW over et gjennomsnitt på ti minutter. Det kan observeres minimale forskjeller i forstyrrelser for februar og april.

Tabell 4-14 viser THDi verdier for ulike nivåer av aktiv effekt over et gjennomsnitt på ti minutter for fase 1. Målinger fra den kaldeste dagen i februar ses i forhold til den varmeste dagen i april. Det kan ikke observeres forbedring i THDi for april sammenlignet med februar.

Tabell 4-14: THDi ved ulike nivåer av effekt for varmeste og kaldeste dag i april og februar. Verdiene utregnes som et gjennomsnitt over ti minutter. Det kan observeres at forstyrrelsene er ganske like de to dagene.

Effekt (kW)	-2,0	-4,0	+6,0
THDi % 18-19 februar	3,39	1,86	1,38
THDi % 17-18 april	3,63	1,74	1,39

Effektfaktor vises i Tabell 4-15 for kaldeste og varmeste dag målt med bil i februar og april. Målingene gjøres over et gjennomsnitt på ti minutter for fase 1. Resultatene viser at verdiene er ganske like begge dagene.

Tabell 4-15: Effektfaktor i februar og april over et gjennomsnitt på ti minutter. Det kan observeres at verdiene er ganske like begge dagene.

Effekt (kW)	-2,0	-4,0	+6,0
PF 18-19 februar	0,9983	0,9992	1,0
PF 17-18 april	0,9980	0,9998	1,0

5. Diskusjon

Dette kapitlet diskuterer resultater basert på de tre problemstillingene. Problemstillingene ser på spenningskvalitet ved opplading og utlading, ved endring i aktiv effekt og SOC og ved temperaturvariasjoner. Det har blitt sett bort ifra frekvens da frekvensen som måles er for hele det nordiske synkronområdet. En elbil vil ikke kunne påvirke frekvensen i hele dette området. Derimot kan flere elbiler ha innvirkning på frekvensen. Opplading av et stort antall elbiler samtidig kan føre til en økning i etterspørselen etter strøm i nettet. Dermed vil frekvensen kunne påvirkes ved at det skapes ubalanse mellom tilbud og etterspørsel i systemet.

5.1 Spenningskvalitet ved opplading og utlading

Delkapitlet tar for seg resultater ved spenningsendringer, spenningsubalanse, harmoniske, THDi og effektfaktor. Resultatene diskuteres og sammenlignes i forhold til tidligere studier, forsøk og relevant teori.

5.1.1 Spenningsendringer og spenningsubalanse

Alle beregninger viser spenningsendringer innenfor FOL sine grenseverdier. For langsomme variasjoner i effektverdien til spenningen ligger disse innenfor $\pm 10\%$ av det avtalte spenningsnivået. Variasjoner i effektverdien til spenningen måles over ett gjennomsnitt på ett minutt. I TN-nettet er det avtalte spenningsnivået 400 V og grenseverdiene mellom 360 og 440 V (Lovdata, 2004).

Resultatene viser at oppladning av elbilen medfører spenningsfall og ubalanse i nettet. Det ses et betydelig spenningsfall i fasespenning 1. Dette resultatet kan forventes da elbilen er koblet opp i enfase i trefasenettet mellom fase 1 og nøytralen. Elbilen vil trekke strøm i fase 1 ved oppladning og spenningen vil falle i fasen. Spenningsene i de to andre fasene holdt seg derimot ganske stabile ved oppladning. Lignende funn er gjort av Sintef i et forsøk hvor en enfaset lader er koblet opp i et 400 V TN-nettet. Sammenlignes spenningsfallet i forsøket til Sintef med dette forsøket, kan det observeres at spenningen faller omtrent like mye ved oppladning i

begge forsøkene. Forskjellen er at startspenningen ved oppladning er noe høyere i dette forsøket sammenlignet med Sintef sitt (Skotland et al., 2016).

Spenningsubalansen i forsøket er på maksimalt 0,57 prosent ved en effekt på 6,0 kW ved oppladning. Dette er under grenseverdien for spenningsusymmetri på 2 prosent fastsatt i FOL som et gjennomsnitt over ti minutter (Lovdata, 2004). Opplading på en fase som gjort i forsøket kan medføre ubalansert drift i systemet. Dette kan føre til økte effekttap og at spenningsgrensene brytes (Ahmadi et al., 2019). Grenseverdiene er innenfor de som er fastsatt for målinger med en elbil. Derimot har tidligere forskning vist at hurtiglading med seks elbiler under toppbelastningstilstand kan medføre brudd på sikkert driftsspenningsnivå (Yong et al., 2015).

Et tiltak for å minimere spenningsubalanse i nettet er aktiv og reaktiv effektkontroll. Studier av Taghizadeh et al (2018), Tan et al (2019) og Young et al (2017) ser på kombinasjon av aktiv og reaktiv effekt ved bruk av multifunksjonelle elbilladere. Resultater fra studiene indikerer at reaktiv effektinjeksjon kan holde nettverksspenningen innenfor grenseområdet og motvirke nettspenningsfall (Taghizadeh et al., 2018; Tan et al., 2019; Yong et al., 2017). Et annet tiltak er å styre opplading og utlading av elbilen. Optimalt valg av status for opplading og utlading, tilkoblingspunkter og strømhastigheter for opplading og utlading kan balansere systemets spenning (Farahani, 2017). Sanntidskoordinering av elbillading ved tilfeldig ankomst og avreise i et bolignettverk har vist seg å være effektivt for å redusere overbelastninger og effekttopper i nettet (Deilami et al., 2011).

Ved utlading ble spenningsprofilen i nettet forbedret sammenlignet med profilen uten elbil. Resultatene viste en forbedring fra 0,32 til 0,08 prosent ved bruk av elbil i utladningsmodus ved en effekt på 6,0 kW. Farahani (2017) viser lignende resultater med en forbedring i spenningsubalansen ved bruk av elbil i utladningsmodus kontra uten elbil (Farahani, 2017). Dette forsøket samt det tidligere forsøket indikerer at V2G muligens kan være et virkemiddel for å redusere spenningsubalanseproblemene i nettet. Ved opplading av flere elbiler kan V2G funksjonen brukes for å minimere ubalanseproblemer som oppstår når flere elbiler skal lades samtidig. Dette kan gjøre det enklere å lade flere elbiler uten at det går utover nettspenningsnivået. På den måten kan ladekostnadene samt topplasten i nettet reduseres.

På en annen side har en tidligere studie indikert at spenningsubalansen i systemet kan øke ved tilkobling av elektriske biler som opererer i V2G- modus til lavlastfasen. Dette gjelder spesielt ved slutten av mateledningen (Shahnia et al., 2013). Dersom V2G skal benyttes for å motvirke ubalanseproblemer i nettet, må dette aspektet tas i betraktning. For å motvirke ubalanse, vil det muligens være mer hensiktsmessig å benytte V2G funksjonen i perioder med høylast i nettet.

5.1.2 Harmoniske, THDi og effektfaktor

Resultater fra forsøket viser minimale forskjeller for overharmoniske strømmer og spenninger i opp og utladningsmodus. Dette gjelder ved effektnivåer på 1,0 kW og 6,2 kW. Det ble ikke observert forbedring i harmoniske forstyrrelser i utladningsmodus.

Det kunne heller ikke observeres noen forbedring i THDi i strømsignalet ved utladning. Dette kan forklares av at THDi beregnes som summen av harmoniske forstyrrelsene til de overharmoniske strømmene. De samme tendensene som ble observert ved overharmoniske strømmer forventes å være til stede ved totale forstyrrelser i strømmen.

For effektfaktor kan minimale forskjeller observeres mellom opp og utladning, samt ingen forbedring i effektfaktor ved utladning. Dette samsvarer med ligning (3) som viser den teoretiske sammenhengen mellom THD og effektfaktor. Ifølge sammenhengen vil en økning i THDi medføre reduksjon i effektfaktor og omvendt. Den teoretiske effektfaktoren som ble beregnet i resultatdelen viser minimalt avvik mellom faktisk effektfaktor og den teoretiske. Dette støtter den teoretiske sammenhengen mellom THD og effektfaktor i ikke lineære belastninger (Mohan, 2012).

Ifølge teorien kan komponenter som filtre i V2G ladere forbedre spenningskvaliteten. Dette oppnås ved at ladere filtrerer ut harmoniske forstyrrelser. Dermed forbedres spenningskvaliteten i utladningsmodus (Bayati et al., 2021; Monteiro et al., 2017). Det ble ikke observert forbedring i spenningskvaliteten ved utladning for hverken overharmoniske strømmer, overharmoniske spenninger, THDi eller effektfaktor. Dette kan være et resultat av dårlige filtre i laderen eller andre faktorer som spiller inn. Flere forsøk med ladere som har avanserte filtre kan muligens gi andre resultater.

5.2 Spenningskvalitet ved endring i aktiv effekt og SOC

Delkapitlet ser på spenningsubalanse, reaktiv effekt, harmoniske og THDi ved ulike nivåer av aktiv effekt. I tillegg ses THDi og effektfaktor på ved endring i SOC for ulike effektnivåer. Funn fra forsøket sammenlignes med tidligere forskning og relevant teori.

5.2.1 Spenningsubalanse og reaktiv effekt ved aktive effektnivåer

Ved sammenligning av spenningsubalanse for ulike nivåer av aktiv effekt kan det observeres forskjeller ved oppladning og utladning. I oppladningsmodus øker spenningsubalansen når batteriene trekker strøm fra nettet. Ubalansen øker ved høyere aktiv effekt når det trekkes mer effekt fra nettet. Motsatt er tilfelle ved lavere effektnivåer når det trekkes mindre strøm fra batteriene. I utladningsmodus reduseres ubalansen ved høyere effektilførsel til nettet. Ved en effekt på 6,0 kW kan det observeres en spenningsubalanse på henholdsvis 0,57 prosent for oppladning og 0,08 prosent for utladning.

En mulig årsak til forskjellene kan være mengden reaktiv effekt som injiseres i nettet i opp og utladningsmodus. Resultater fra et lignende forsøk av Casaleiro et al (2020) viser en reduksjon i reaktiv effekt ved oppladning og en økning ved utladning. Desto mer aktiv effekt som leveres til nettet, jo mer reaktiv effekt injiseres. Motsatt er tilfelle ved opplading hvor reaktiv effekt reduseres ved høyere opplading (Casaleiro et al., 2020). Tidligere studier indikerer forbedret spenningsprofil og mindre nettspenningsfall ved et høyere nivå av reaktiv effekt i nettet (Taghizadeh et al., 2018; Tan et al., 2019; Yong et al., 2017). En bedre spenningsprofil med mindre nettspenningsfall vil gi lavere ubalanse i nettet. Konsekvensen av dette er en forbedret spenningsprofil og redusert ubalanse i utladningsmodus som følge av økt reaktiv effekt.

Resultater fra dette forsøket er lignende resultatene fra forsøket til Casaleiro et al (2020) i forhold til mengden reaktiv effekt i nettet ved ulike effektnivå og modus (Casaleiro et al., 2020). I dette forsøket ses det en reduksjon i reaktiv effekt ved oppladning og en økning ved utladning i forhold til mengden aktiv effekt som blir injisert i nettet. Det kan også observeres en reduksjon i reaktiv effekt når laderen kontrolleres uten at elbilen er tilkoblet fra Figur 8-23 i Vedlegg C. Regulering av aktive effektnivåer i forhold til mengden reaktiv effekt i nettet kan være et godt tiltak for å minske ubalanse ved opplading. Gjennom å måle andelen reaktiv effekt som reduseres ved oppladning, kan man finne ut hvor mye som trengs for å opprettholde et stabilt effektnivå i nettet. Effektnivåene må også vurderes opp mot andre forstyrrelser som kan oppstå ved regulerte effekter.

5.2.2 Harmoniske, THDi og effektfaktor ved forandring i aktiv effekt

Harmoniske forstyrrelser i strømsignalet øker ved lavere effektnivåer for odde harmoniske ordener av aktiv effekt. Sammenlignes de harmoniske forstyrrelsene i de odde harmoniske ordenene med IEC 61000-3-12 internasjonal standard, kan det observeres overskridelse av grenseverdier. For høye effektnivåer på 6,0 og 6,2 kW kan det ses overskridelse av verdier for 11 og 13 orden harmoniske. Dette gjelder både for opplading og utladning av elbilen. Ved lavere effektverdier overskrideres grenseverdiene for flere av ordenene. For effektnivåer på 3,0 kW overskrideres verdier i henholdsvis 7,11,13 og 15 orden ved oppladning og 5,7,11,13 og 15 ved utladning. Ved effekt på 1,0 kW overskrideres alle grenseverdiene unntatt i orden 3 ved både oppladning og utladning (Wang et al., 2024).

De harmoniske forstyrrelsene i spenningssignalet er lave for odde harmoniske ordener ved effekter på både 1 kW og 6,2 kW. Disse forstyrrelsene kan ses i Figur 4-5 og Figur 4-6. De harmoniske forstyrrelsene er langt under grenseverdiene fastsatt i FOL. Grenseverdier i FOL kan observeres fra Tabell 2-1 (Lovdata, 2004).

Resultater fra forsøket viser høy THDi når elbilen er tilkoblet og hverken lader eller utlader. THDi er også høy når elbilen ikke er tilkoblet nettet. Det samme gjelder når laderen kontrolleres og elbilen ikke er tilkoblet som kan observeres fra Figur 8-31 i Vedlegg D. Årsaken til de høye verdiene av THDi kan være komponenter i laderen som er i kontinuerlig drift, samt at laderen kontrolleres ved en ekstern programvare for fjernkontroll. Det kan

observeres lave verdier i THDi når laderen tilkobles og batteriet opplades og utlades. THDi reduseres jo nærmere man kommer nominell effekt og øker ved lavere effektnivåer.

Målingene viser lavest THDi verdier ved effekt på 6,0 kW og høyest ved effekt på 1,0 kW.

Reduksjon av effekter under nominelt nivå kan være interessant for å se hvordan V2G kan benyttes sammen med integrasjon av fornybar energi. I dette tilfellet kan det være nødvendig å drifte elbilladere under nominelt nivå. Dette kan påvirke spenningskvaliteten negativt, da komponenter som likerettere og vekselrettere i elbilladere har vist seg å ha best funksjon ved nominell effekt (Casaleiro et al., 2021). Ved reduksjon i effektnivåer øker THDi i forsøket. En studie av Casaleiro et al (2021) som ser på varierende effekter fra en 10 kW V2G lader, viser lignende økning i THDi ved reduserte effektnivåer. Sammenlignes resultatene fra dette forsøket med deres studie, kan det observeres en større økning i THDi ved reduserte effekter i deres studie. Dette kan muligens komme av at det ble benyttet en trefaset lader i deres forsøk, men en enfaset lader i dette forsøket. Forsøket deres ble også utført i Portugal hvor det er annerledes klima med en utendørs lader som har noe høyere effekt. I tillegg har bygget hvor forsøket deres ble gjennomført andre belastningsforhold og elektriske komponenter tilkoblet sammenlignet med dette forsøket. Disse faktorene kan påvirke resultatene (Casaleiro et al., 2021).

I forsøket ble effektfaktoren i fase 1 redusert ved lave effektnivåer ved opp og utladning. Lignende resultater har blitt funnet fra tidligere forsøk. Casaleiro et al (2020) konkluderte med at effektfaktoren degraderte ved strømverdier under 50% av laderens nominelle kraft. Dette når elbilen ble oppladet og utladet (Casaleiro et al., 2020). I forsøket til Casaleiro et al (2021) kan det observeres at effektfaktoren faller for lavere effektnivåer under nominell effekt. Det kan i deres forsøk observeres et større fall i effektfaktor ved effekter under 75 prosent av den nominelle. Det er også større forskjell mellom opp og utladningsmodus. I utladningsmodus er effektverdiene lavere og disse faller også mer ved reduserte effektverdier sammenlignet med i oppladningsmodus (Casaleiro et al., 2021). I dette forsøket er effektfaktoren ganske stabil og faller i liten grad ved reduksjon i effektnivåer ved oppladning og utladning. Årsaken til ulikheter i effektfaktor mellom denne studien og den tidligere har muligens å gjøre med type lader som ble brukt. Virkningsgraden til laderen kan være ulik i en trefaset lader sammenlignet med en enfaset lader som ble benyttet i dette forsøket.

Den totale effektfaktoren er lavere enn effektfaktoren for fase 1 i forsøket. Dette kan komme av at det går en liten strøm i fase 3 og en minimal strøm i fase 2. Dermed oppstår det tap i systemet. Det kan observeres at effektfaktoren forbedres når strømmen i fase 2 og 3 reduseres. Dette ses ved utladning på 1,0 kW hvor strømmen i fase 3 er lavere.

5.2.3 THDi og effektfaktor ved endring i SOC

Ved ulike nivåer av SOC er effektfaktoren ganske stabil i forsøket. Det kan observeres at effektfaktoren faller ved reduksjon i aktiv effekt ved forskjellige SOC. Dette gjelder både for oppladning og utladning av batteriet.

For oppladning på 1 og 6 kW reduseres THDi verdiene noe mellom 75 og 85 prosent SOC og 60 og 81 prosent SOC. Dette kan ha med ladeprofilen til lithiumion batterier å gjøre.

Lithiumion batterier lader med konstant strøm frem til batterispenningen når ønsket nivå og går deretter over til konstant spenning (Bayati et al., 2021). Ved høyere SOC ved konstant strøm kan muligens strømmen være mer stabil og dermed redusere forstyrrelsene i nettet noe. For å kunne si om dette er en trend bør flere målinger ved lavere SOC verdier under 60 prosent gjøres. Ved oppladning på 6 kW kan det observeres at THDi øker litt igjen ved 90 prosent SOC. Dette kan være fordi batteriet har gått over fra konstant strøm til konstant spenning ved dette nivået av SOC. Et resultat kan være at strømmen blir mindre stabil og THDi verdiene øker.

Tidligere forskning har sett lignende resultater når batteriet går fra konstant strøm til konstant spenning. Høyere THDi har blitt observert når batteriet nærmer seg full lading og utgangseffekten til laderen synker (Kütt et al., 2013).

I utladningsmodus ses det varierende verdier av THDi ved reduksjon i SOC. Når SOC reduseres fra rundt 80 til 60 prosent kan det observeres en liten reduksjon i THDi ved effekter på 1, 2 og 4 kW. Ut ifra utladningsprofilen til batteriet vil spenningen synke og strømmen holdes konstant ved reduksjon av SOC fra 80 til 60 prosent (Xue et al., 2014). Resultatene kan indikere at THDi minker noe ved reduksjon i spenningsnivå i utladningsmodus. Siden THDi verdiene er varierende mellom 60 og 80 prosent, samt en lav THDi verdi ved 90 prosent, trengs det flere målinger og analyser for å bekrefte observasjonen med større sikkerhet.

5.3 Spenningskvalitet ved temperaturvariasjoner

Delkapitlet ser på resultater ved temperaturvariasjoner i februar og april mellom kaldeste og varmeste dag. I Norge er utendørs temperaturer svært varierende mellom sommer og vinter. Målinger fra Energinet i Ås viser en variasjon i gjennomsnittlige utendørstemperaturer for kaldeste dag på -20 og varmeste dag på 10 grader til nå i 2024.

Teori viser at temperaturendringer kan påvirkes av både laderen og elbilens batteri. Lave temperaturer kan medføre tap i ladere i form av svitsjetap og ledningstap. Effektiviteten i systemet reduseres ved høyere svitsjetap og ledningstap (Bayati et al., 2021). Den indre motstanden i batteriet kan også øke ved lave temperaturer. Dette kan medføre reduserte kraftegenskaper og batterikapitet (Zhang et al., 2022). Det antas at laderen ikke påvirkes av utendørs temperaturendringer i forsøket da den befinner seg innendørs. Temperaturen inne i bygget er satt til romtemperatur. Endringer i utendørs temperaturer vil derimot kunne påvirke funksjonaliteten til elbilens batteri.

Gjennomsnittlig temperaturforskjell mellom kaldeste og varmeste dag i februar og april var på 7,6 grader. Temperaturendringer sin effekt på spenningskvaliteten ble identifisert ved å analysere spenningsubalanse, harmoniske forstyrrelser, THDi og effektfaktor.

5.3.1 Spenningsubalanse

Resultater viser at spenningsubalansen den kaldeste dagen i februar og varmeste dagen i april holder seg innenfor grenseverdiene til FOL på 2 prosent (Aabakken et al., 2018). Den høyeste spenningsubalansen som ble målt var på 0,54 prosent ved oppladning på 6,0 kW. Spenningsubalansen er noe lavere den varmeste dagen i april kontra den kaldeste dagen i februar ved de ulike effektnivåene.

En tidligere studie av Lucas et al (2018) har sett på spenningsubalanse ved hurtiglading for ulike temperaturer mellom -40 og 25 grader. Resultatene viser at spenningsubalanse også i det forsøket holder seg innenfor referanseverdiene på 2 prosent. Dette gjelder for alle laderne ved de ulike temperaturene. Den høyeste spenningsubalansen som ble målt for en av laderne var på 0,84 prosent (Lucas et al., 2018).

5.3.2 Harmoniske, THDi og effektfaktor

Resultater fra forsøket viste ingen forbedring i harmoniske, THDi eller effektfaktor for den varmeste dagen i april sammenlignet med den kaldeste dagen i februar.

Tidligere forsøk har vist at spenningskvaliteten for elbiler som hurtiglades kan påvirkes ved lave temperaturer. Resultater fra Lucas et al (2018) viste en økning i THDi ved reduserte temperaturer. Lavere temperaturer medførte økt ladetid og redusert ladekapasitet (Lucas et al., 2018). Studien av Trentadue et al (2018) viste at lavere temperaturer hadde negativ innvirkning på ladernes effektivitet, ladetid og spenningskvalitet (Trentadue et al., 2018).

De tidligere forsøkene indikerer at spenningskvaliteten kan reduseres ved lavere temperaturer. Forsøkene ser på hurtiglading av elbiler innendørs ved simulerte utendørstemperaturer. Siden laderen befinner seg innendørs ved romtemperatur i dette forsøket, antas det at kun elbilens batteri påvirkes av utendørs temperaturendringer. Laderen antas ikke å påvirkes av temperaturendringer i motsetning til i de tidligere forsøkene. Dette kan ha innvirkning på resultatene i forsøket, da spenningskvaliteten muligens ikke påvirkes i like stor grad når kun elbilbatteriet eksponeres for utendørstemperaturene.

For målingene ble gjennomsnittstemperaturer på -1,2 og 6,4 grader for den kaldeste dagen i februar og varmeste dagen i april benyttet. Teori indikerer at effektiviteten til lithiumbatterier påvirkes ved lave temperaturer. Det oppstår tap i batteriene ved temperaturer under null grader på grunn av reduserte energi og kraftkapasiteter (Jaguemont et al., 2016). En studie av Aris et al (2017) bekrefter dette ved å se på driftsforholdene til en lithiumioncelle i et batteri ved lave temperaturforhold. Fra studien ble det observert at batterikapasiteten redusertes ved temperaturer under null når cellens indre motstand øktes (Aris & Shabani, 2017). En reduksjon i effektfaktor ved lave temperaturer ble ikke observert i forsøket. Det kan merke seg at det i dette forsøket kun er sett på temperaturer rett under null grader. Reduserte temperaturer ned mot -15 til -20 ville muligens kunne medført lavere effektfaktor.

6. Konklusjon

Opplading av elbilen medførte spenningsproblemer som spenningsfall og ubalanse. Spenningsproblemene kunne kobles til en reduksjon i reaktiv effekt. Ubalansen lå innenfor grenseverdiene i FOL ved en elbil (Lovdata, 2004). Imidlertid kan ubalanseproblemer oppstå dersom flere elbiler lades samtidig (Yong et al., 2015). Utladning av elbilen medførte forbedring i spenningsprofilen i nettet, og kunne knyttes til en liten økning i reaktiv effekt. Under forsøket ble det observert en økning i ubalanse ved høyere effekter ved opplading, samt reduksjon ved høyere effekter ved utlading. Den reaktive effektkurven var speilvendt i forhold til den aktive. Ubalanseproblemene som ble identifisert kan potensielt reduseres ved kontroll av aktiv og reaktiv effekt (Taghizadeh et al., 2018; Tan et al., 2019; Yong et al., 2017).

Videre ble det observert lignende harmoniske forstyrrelser, THDi og effektfaktor under opplading og utlading. Forbedringen som var forventet i utladningsmodus relatert til filtre i laderen, ble ikke observert (Kusko & Thompsom, 2007; Reznik et al., 2013). Den teoretiske effektfaktoren var ganske lik den målte effektfaktoren. Dette støttet den teoretiske sammenhengen mellom THD og effektfaktor i ikke lineære belastninger (Mohan, 2012).

THDi verdier steg ved effektverdier under de nominelle. Samme tendenser ble observert for effektfaktor og overharmoniske forstyrrelser i strøm og spenning. Effektverdier under de nominelle medførte redusert effektfaktor og høyere overharmoniske forstyrrelser. Total effektfaktor var noe lavere enn effektfaktor i fase 1 siden det gikk litt strøm i fase 2 og 3, og dermed oppstod tap. Ved tilkobling av elbilen var harmoniske strømmer utenfor noen av grenseverdiene fra IEC 61000-3-12 standard ved både opplading og utlading (Wang et al., 2024). Lavere effektverdier medførte overskridelse av flere grenseverdier sammenlignet med høyere effekter. Ved økning i SOC ble THDi redusert under opplading. THDi ble også litt redusert under utladning ved lavere SOC. Effektfaktoren holdt seg stabil ved endringer i SOC.

Temperaturrendringer medførte en liten forbedring i spenningsubalanse ved høye temperaturer sammenlignet med ved lave. Det ble ikke observert noen tydelig forbedring i hverken harmoniske forstyrrelser, THDi eller effektfaktor ved økte temperaturer. Dette kunne muligens vært annerledes dersom enda lavere temperaturer hadde blitt analysert i forsøket.

7. Videre arbeid

Analyse av resultatene fra forsøket med elbil tilkoblet en bygning med V2G funksjon indikerer flere områder for videre undersøkelse.

En utfordring som ble identifisert, er effekten av opplading på spenningskvaliteten i nettet. Resultater viste spenningsfall og ubalanse ved oppladning. Utladning medførte derimot forbedret spenningsprofil. Videre forskning bør analysere hvordan oppladning og utladning av elbiler kan kombineres for batteristøtte ved lave forstyrrelser i nettet.

Et annet aspekt som kan undersøkes er bruk av aktiv og reaktiv effektkontroll for å forbedre spenningsprofilen i nettet. I dette forsøket ble det observert redusert ubalanse og jevnere spenning ved høyere nivå av reaktiv effekt ved utlading. Tidligere studier har indikert at reaktiv effekt ved ladning kan opprettholde nettverksspenningen innenfor grenseområdet (Taghizadeh et al., 2018; Tan et al., 2019; Yong et al., 2017). Videre forskning kan utforske kombinasjon av aktiv og reaktiv effekt fra flere elbiler, der effekten fra bilene varierer i forhold til produksjonen fra fornybare kilder som for eksempel solcellepanel i området.

Temperatur sin innvirkning på V2G teknologi er også et aspekt som bør undersøkes nærmere. I forsøket ble det sett på spenningskvalitet ved temperaturer rett under null grader. I Norge kan det være betydelig lavere temperaturer om vinteren. Det anbefales å se på temperaturer helt ned til -20 grader for et helhetlig bilde av V2G teknologi sin påvirkning på spenningskvaliteten.

I tillegg er forbedring av ladeteknologien et område som bør utforskes videre. Filtre i V2G ladere kan filtrere ut harmoniske forstyrrelser (Kusko & Thompsom, 2007; Reznik et al., 2013). I forsøket ble det hverken observert forbedret THDi eller effektfaktor ved utladning i forhold til oppladning. Potensielt kan utladning av elbiler medføre mindre forstyrrelser dersom det utvikles mer avanserte filtre i laderne. Mindre forstyrrelser kan øke effektiviteten og påliteligheten til V2G systemer. Dette kan øke funksjonaliteten til laderne og gjøre elbiler mer attraktive som batteristøtte til nettet.

8. Referanser

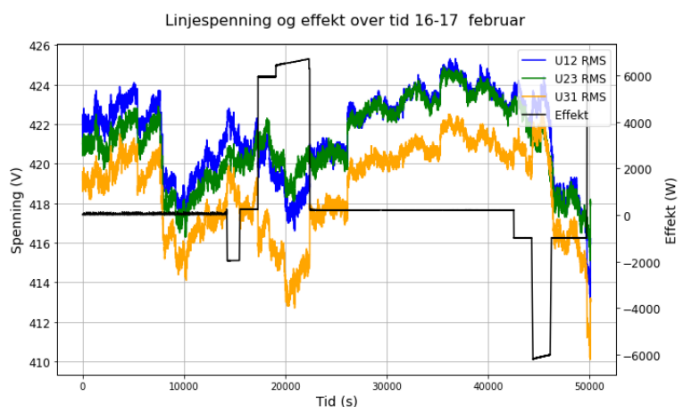
- Ahmadi, A., Tavakoli, A., Jamborsalamati, P., Rezaei, N., Miveh, M. R., Gandoman, F. H., Heidari, A., & Nezhad, A. E. (2019). Power quality improvement in smart grids using electric vehicles: a review. *IET Electrical Systems in Transportation*, 9(2), 53-64.
- Ahsan, S. M., Khan, H. A., Hussain, A., Tariq, S., & Zaffar, N. A. (2021). Harmonic analysis of grid-connected solar PV systems with nonlinear household loads in low-voltage distribution networks. *Sustainability*, 13(7), 3709.
- Arghandeh, R., Onen, A., Jung, J., Cheng, D., Broadwater, R. P., & Centeno, V. (2014). Phasor-based assessment for harmonic sources in distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 116, 94-105.
- Aris, A. M., & Shabani, B. (2017). An experimental study of a lithium ion cell operation at low temperature conditions. *Energy Procedia*, 110, 128-135.
- Arnoux, C. (2019). C.A 8331 C.A 8333 Three-phase electrical analyser In.
- Bayati, M., Abedi, M., Farahmandrad, M., Gharehpetian, G. B., & Tehrani, K. (2021). Important technical considerations in design of battery chargers of electric vehicles. *Energies*, 14(18), 5878.
- Casaleiro, A., Amaro e Silva, R., & Serra, J. (2020). Plug-in electric vehicles for grid services provision: Proposing an operational characterization procedure for V2G systems. *Energies*, 13(5), 1240.
- Casaleiro, A., e Silva, R. A., Teixeira, B., & Serra, J. M. (2021). Experimental assessment and model validation of power quality parameters for vehicle-to-grid systems. *Electric Power Systems Research*, 191, 106891.
- Deilami, S., Masoum, A. S., Moses, P. S., & Masoum, M. A. (2011). Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile. *IEEE Transactions on smart grid*, 2(3), 456-467.
- Economics, O. (2019). Nettkundenes nytte av en oppgradering av lavspenningsnettet. *Norges Vassdrags-og energidirektorat*, 40.
- Elbilgrossisten. (2024a). Ladeguiden: Hurtiglading av elektriske kjøretøy. <https://www.elbilgrossisten.no/pages/ladeguiden-hurtiglading>
- Elbilgrossisten. (2024b). Ladeguiden: Type 1 og type 2. <https://www.elbilgrossisten.no/pages/ladeguiden-type1-type2>
- Electric, S. (2018). Electric- Electrical Installation Guide 2018 https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=EIGED306001EN
- Elkholy, A. (2019). Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems. *Solar Energy*, 183, 315-326.
- Erb, D. C., Onar, O. C., & Khaligh, A. (2010). Bi-directional charging topologies for plug-in hybrid electric vehicles. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC),
- Farahani, H. F. (2017). Improving voltage unbalance of low-voltage distribution networks using plug-in electric vehicles. *Journal of cleaner production*, 148, 336-346.

- Gao, Y., Zhang, X., Cheng, Q., Guo, B., & Yang, J. (2019). Classification and review of the charging strategies for commercial lithium-ion batteries. *Ieee Access*, 7, 43511-43524.
- Horne, H., Buvik, M., & Hole, J. (2019). Smarte ladesystemer og Vehicle-to-Grid. *Norges Vassdrags-og energidirektorat*.
- Jaguemont, J., Boulon, L., & Dubé, Y. (2016). A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Applied energy*, 164, 99-114.
- Kesler, M., Kisacikoglu, M. C., & Tolbert, L. M. (2014). Vehicle-to-grid reactive power operation using plug-in electric vehicle bidirectional offboard charger. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(12), 6778-6784.
- Kiona. (2024). Energinet Vårt markedsledende energioppfølgingssystem.
<https://kiona.com/no/produkter/energinet>
- Kusko, A., & Thompsom, M. T. (2007). *Power Quality in Electrical Systems*. McGraw Hill
- Kütt, L., Saarijärvi, E., Lehtonen, M., Mölder, H., & Niitsoo, J. (2013). A review of the harmonic and unbalance effects in electrical distribution networks due to EV charging. 2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering,
- Lovdata, N. (1999). *Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg*. Justis- og beredskapsdepartementet Retrieved from <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1998-11-06-1060>
- Lovdata, N. (2004). *Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet*. Lovdata: Energidepartementet Retrieved from <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-11-30-1557>
- Lovdata, N. (2012). *Forskrift om sikkerhet og beredskap i kraftforsyningen (kraftberedskapsforskriften)*. Energidepartementet Retrieved from <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2012-12-07-1157>
- Lucas, A., Trentadue, G., Scholz, H., & Otura, M. (2018). Power quality performance of fast-charging under extreme temperature conditions. *Energies*, 11(10), 2635.
- Michalec, Ł., Jasiński, M., Sikorski, T., Leonowicz, Z., Jasiński, Ł., & Suresh, V. (2021). Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality of a low voltage network—review and case study. *Energies*, 14(12), 3665.
- Mohan, N. (2012). *Power Electronics*. John Wiley & Sons.
- Monteiro, V., Ferreira, J. C., Melendez, A. A. N., Couto, C., & Afonso, J. L. (2017). Experimental validation of a novel architecture based on a dual-stage converter for off-board fast battery chargers of electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(2), 1000-1011.
- Pilskog, G. M., & Bråthen, H. (2024). Nysgjerrig på elbiler i Norge? Se siste elbilstatistikk her.
- Rampinelli, G. A., Gasparin, F. P., Bühler, A. J., Krenzinger, A., & Romero, F. C. (2015). Assessment and mathematical modeling of energy quality parameters of grid connected photovoltaic inverters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 133-141.
- Reznik, A., Simões, M. G., Al-Durra, A., & Mueen, S. (2013). LCL filter design and performance analysis for grid-interconnected systems. *IEEE transactions on industry applications*, 50(2), 1225-1232.
- Shahnia, F., Ghosh, A., Ledwich, G., & Zare, F. (2013). Predicting Voltage Unbalance Impacts of Plug-in Electric Vehicles Penetration in Residential Low-voltage Distribution Networks. *Electric Power Components and Systems*, 41(16), 1594-1616.
- Shen, W., Vo, T. T., & Kapoor, A. (2012). Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview. 2012 7th IEEE conference on industrial electronics and applications (ICIEA),

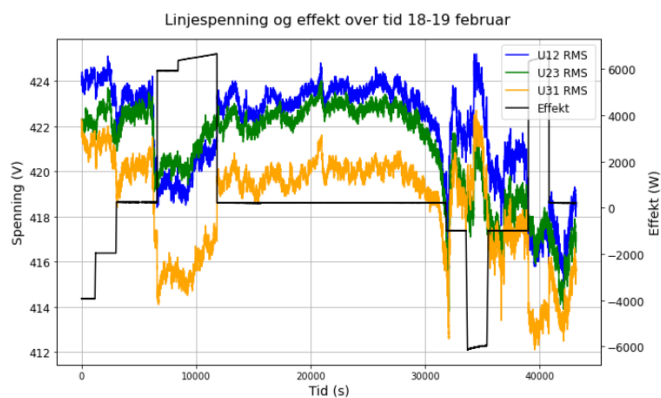
- Sidrach-de-Cardona, M., & Carretero, J. (2005). Analysis of the current total harmonic distortion for different single-phase inverters for grid-connected pv-systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87(1-4), 529-540.
- Singh, A., Pal, K., & Vishwakarma, C. (2023). State of charge estimation techniques of Li-ion battery of electric vehicles. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 6, 100328.
- Skotland, C. H., Eggum, E., & Spilde, D. (2016). Hva betyr elbiler for strømmettet? *Norges vassdrags-og energidirektorat* (74-16).
- Spilde, D., & Skotland, C. (2015). Hvordan vil en omfattende elektrifisering av transportsektoren påvirke kraftsystemet. *The Norwegian Water Resources and Energy Directorate: Oslo, Norway*.
- Sørensen, Å. L., Morsund, B., Andresen, I., Sartori, I., & Lindberg, K. B. (2024). Energy profiles and electricity flexibility potential in apartment buildings with electric vehicles—A Norwegian case study. *Energy and Buildings*, 305, 113878.
- Taghizadeh, S., Hossain, M., Lu, J., & Water, W. (2018). A unified multi-functional on-board EV charger for power-quality control in household networks. *Applied energy*, 215, 186-201.
- Tan, K. M., Padmanaban, S., Yong, J. Y., & Ramachandaramurthy, V. K. (2019). A multi-control vehicle-to-grid charger with bi-directional active and reactive power capabilities for power grid support. *Energy*, 171, 1150-1163.
- Trentadue, G., Lucas, A., Otura, M., Pliakostathis, K., Zanni, M., & Scholz, H. (2018). Evaluation of fast charging efficiency under extreme temperatures. *Energies*, 11(8), 1937.
- TSOs, N. (2019). Nordic system operation agreement (SOA)-annex load-frequency control & reserves (LFCR).
- Wallbox. (2024). Quasar. https://wallbox.com/en_ca/quasar-dc-charger
- Wang, B., Wang, S., & Yu, X. (2024). Recent Advances in Bridge-Less Power Factor Correction Converter. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 81, 49-58.
- Xue, N., Du, W., Greszler, T. A., Shyy, W., & Martins, J. R. (2014). Design of a lithium-ion battery pack for PHEV using a hybrid optimization method. *Applied energy*, 115, 591-602.
- Yong, J. Y., Fazeli, S. M., Ramachandaramurthy, V. K., & Tan, K. M. (2017). Design and development of a three-phase off-board electric vehicle charger prototype for power grid voltage regulation. *Energy*, 133, 128-141.
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). Bi-directional electric vehicle fast charging station with novel reactive power compensation for voltage regulation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 300-310.
- Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., & Du, Z. (2022). A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy*, 238, 121652.
- Aabakken, C., Nordeng, R. A., Eggum, E., Hansen, H., & Tjersland, J. (2018). Veileder til leveringskvalitetsforskriften. *Norges vassdrags-og energidirektorat, Tech rep*, 7(12.2018).

Vedlegg A

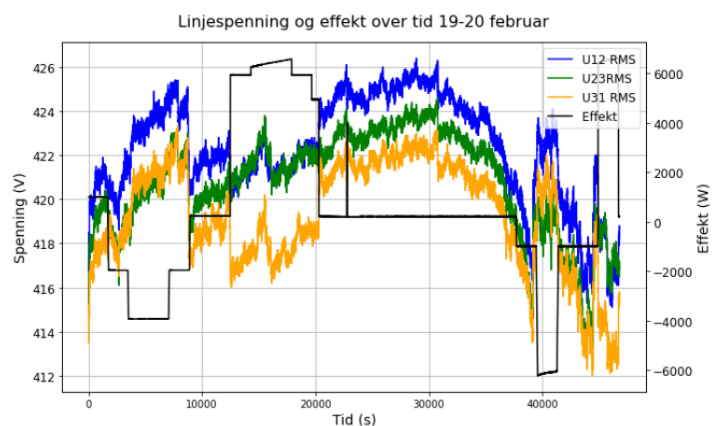
A.1 Linjespenning og effekt med elbil



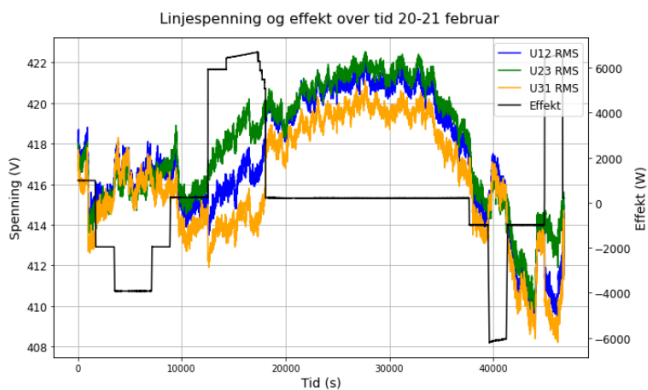
Figur 8-2: Linjespenning og effekt over tid 18-19 februar



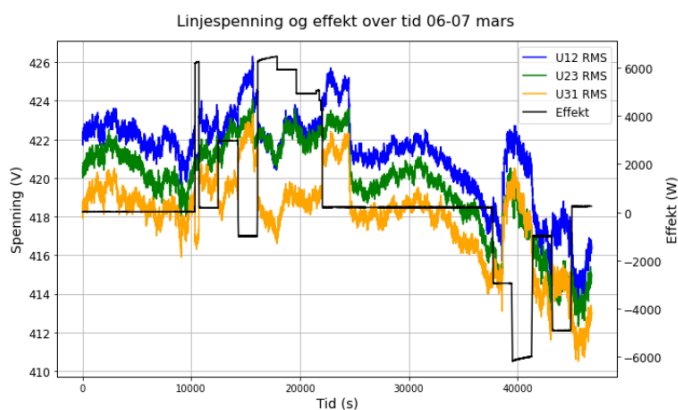
Figur 8-1: Linjespenning og effekt over tid 16-17 februar



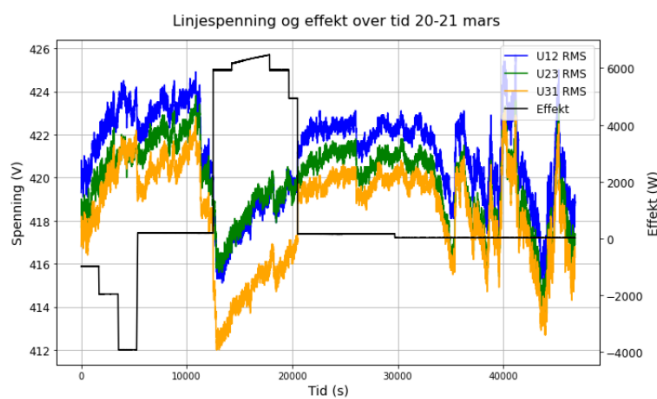
Figur 8-4: Linjespenning og effekt over tid 20-21 februar



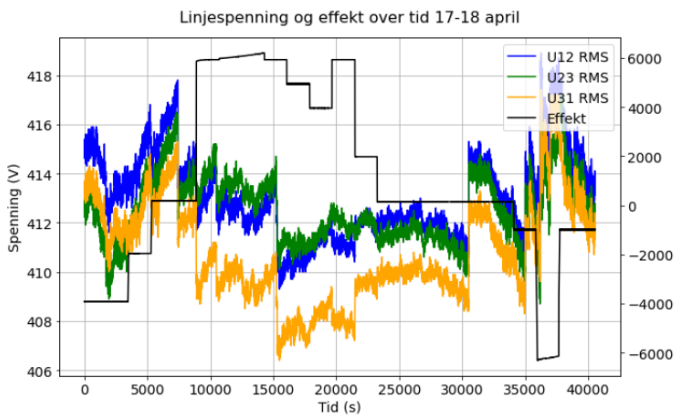
Figur 8-3: Linjespenning og effekt over tid 19-20 februar



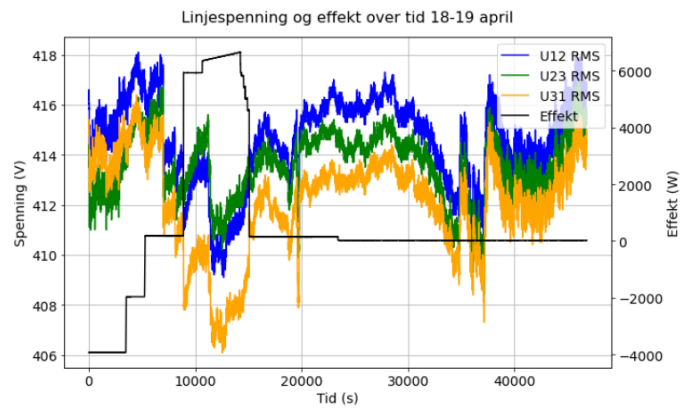
Figur 8-5: Linjespenning og effekt over tid 06-07 mars



Figur 8-6: Linjespenning og effekt over tid 20-21 mars

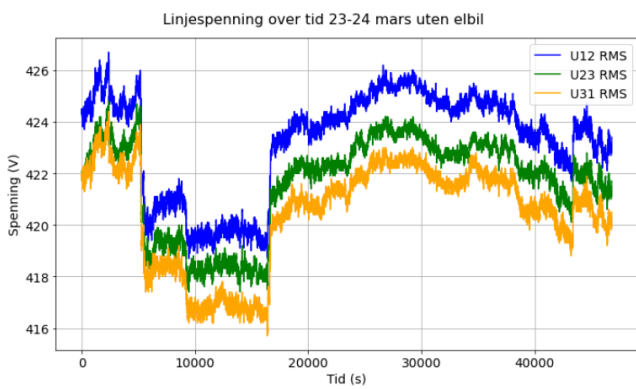


Figur 8-7: Linjespenning og effekt over tid 17-18 april

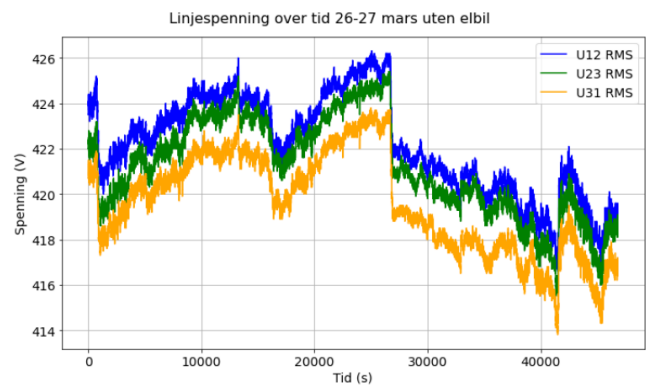


Figur 8-8: Linjespenning og effekt over tid 18-19 april

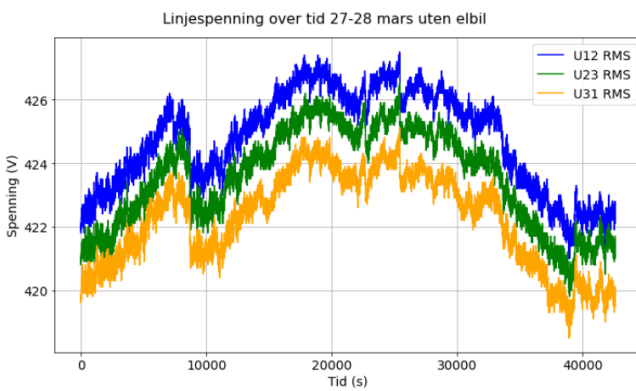
A.2 Linjespenning uten elbil



Figur 8-9: Linjespenning over tid 23-24 mars uten elbil



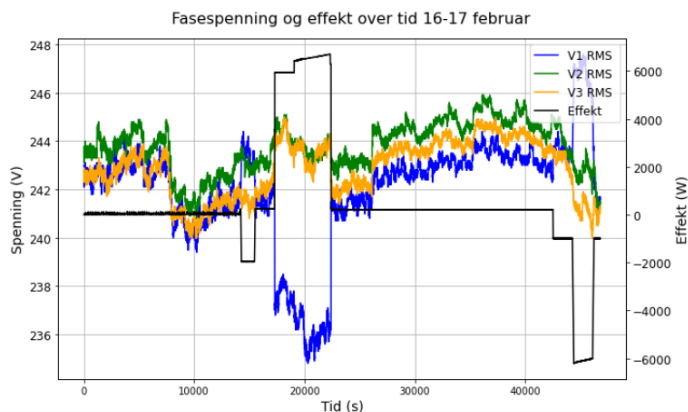
Figur 8-10: Linjespenning over tid 26-27 mars uten elbil



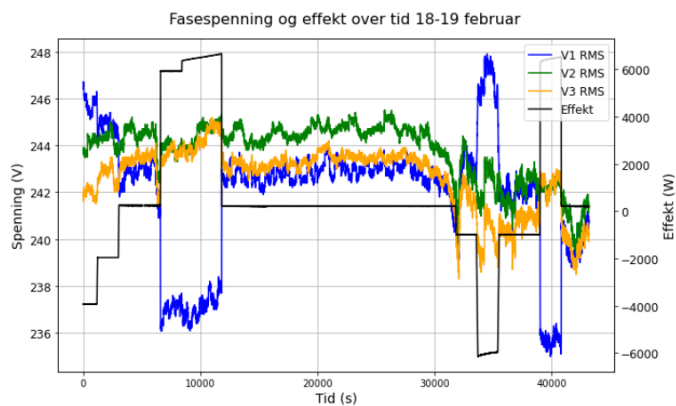
Figur 8-11: Linjespenning over tid 27-28 mars uten elbil

Vedlegg B

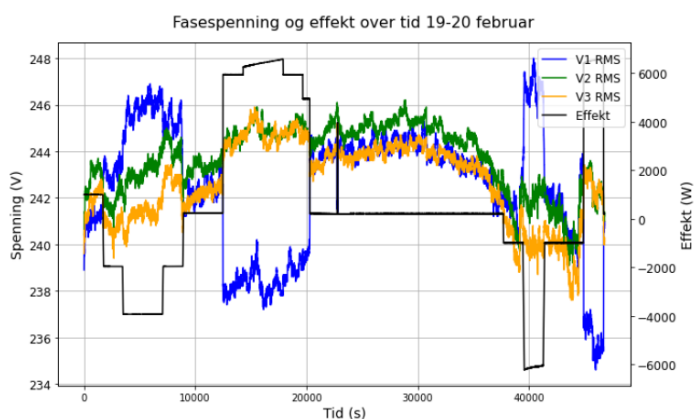
B.1 Fasespenning og effekt med elbil



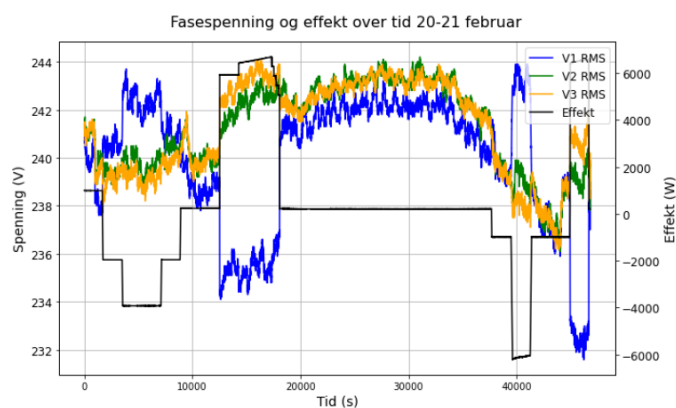
Figur 8-12: Fasespenning og effekt over tid 16-17 februar



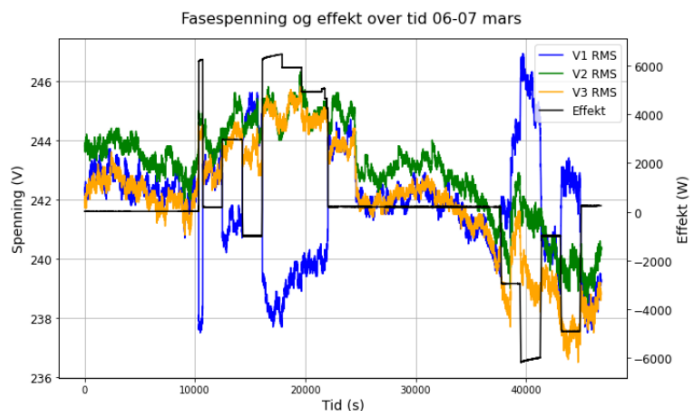
Figur 8-13: Fasespenning og effekt over tid 18-19 februar



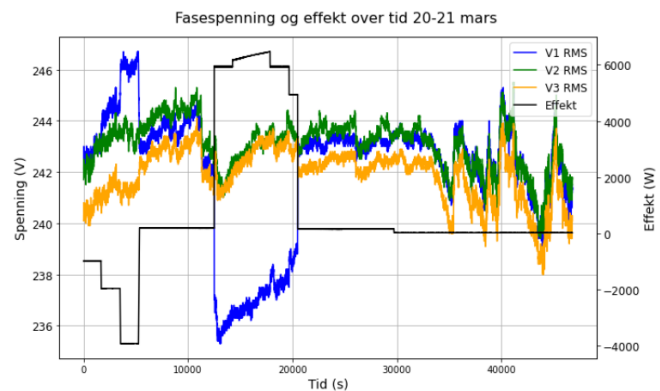
Figur 8-14: Fasespenning og effekt over tid 19-20 februar



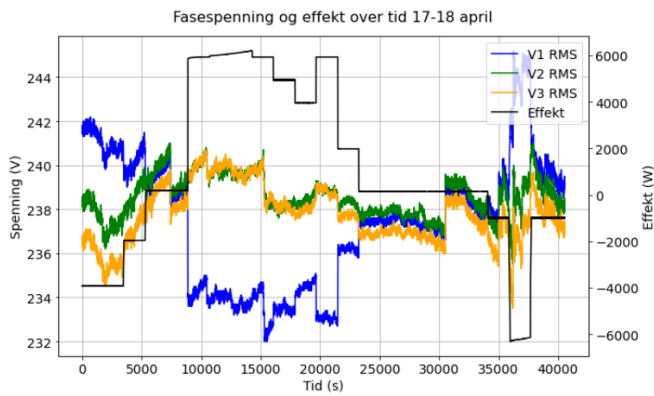
Figur 8-15: Fasespenning og effekt over tid 20-21 februar



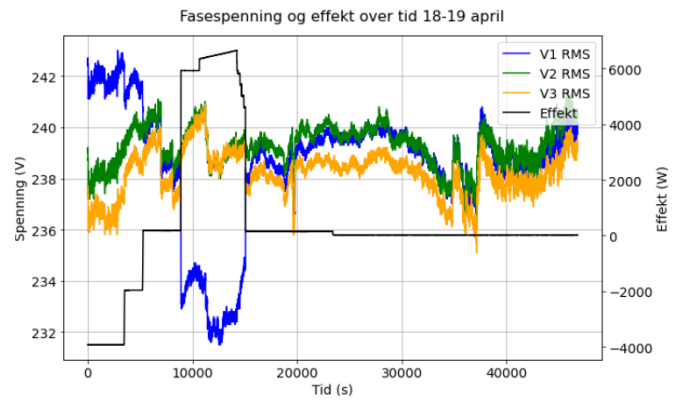
Figur 8-16: Fasespenning og effekt over tid 06-07 mars



Figur 8-17: Fasespenning og effekt over tid 20-21 mars

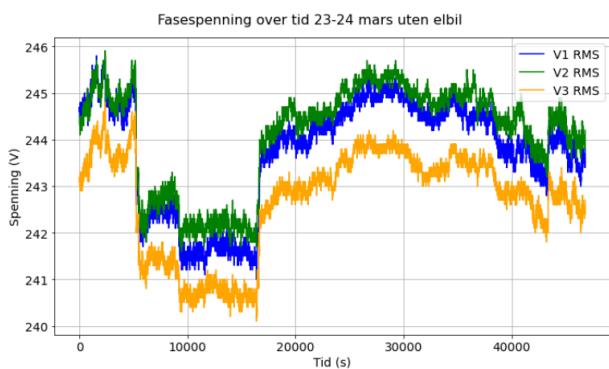


Figur 8-18: Fasespenning og effekt over tid 17-18 april

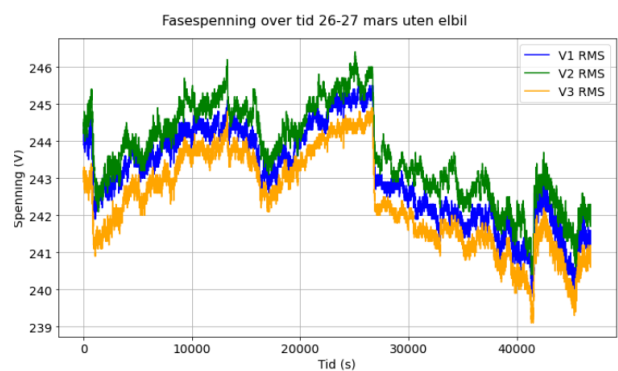


Figur 8-19: Fasespenning og effekt over tid 18-19 april

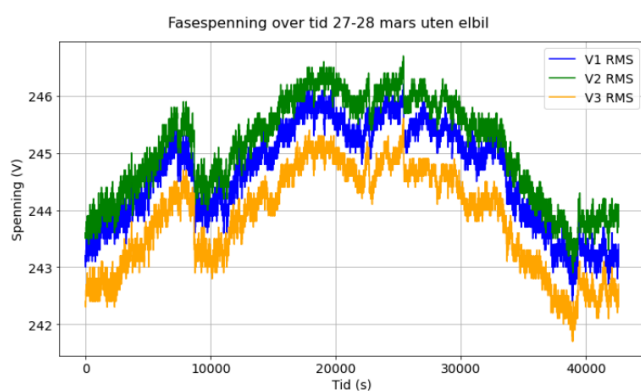
B.2 Fasespenning uten elbil



Figur 8-20: Fasespenning over tid 23-24 mars uten elbil



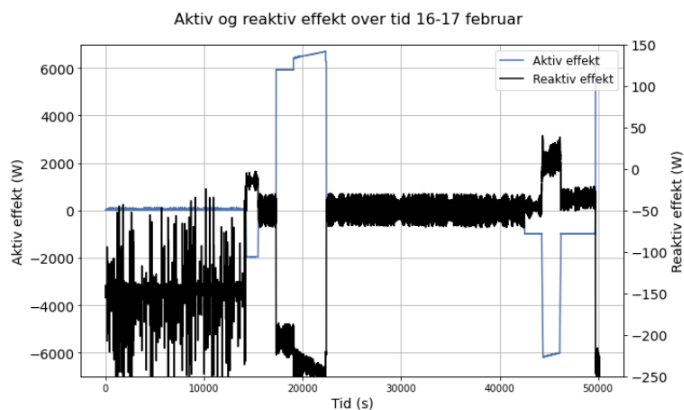
Figur 8-21: Fasespenning over tid 26-27 mars uten elbil



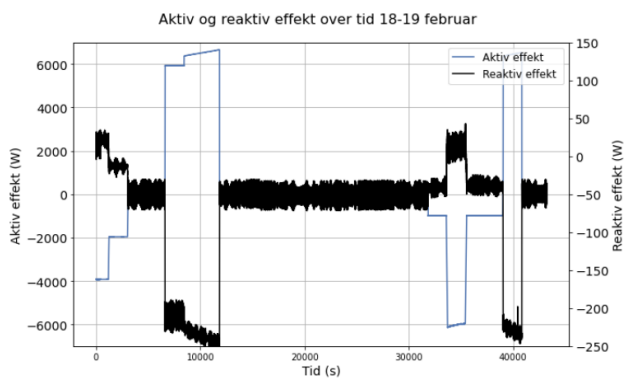
Figur 8-22: Fasespenning over tid 27-28 uten elbil

Vedlegg C

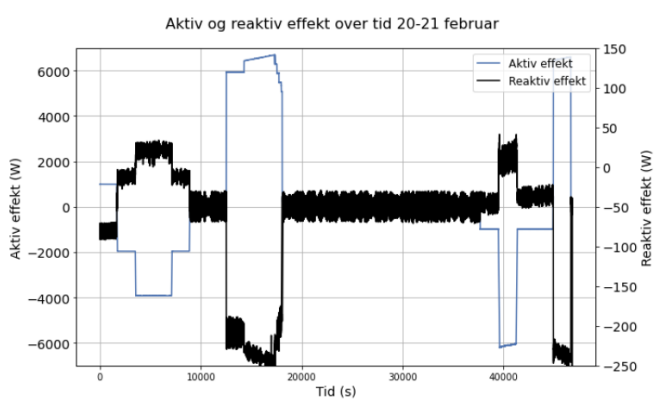
C.1 Aktiv og reaktiv effekt



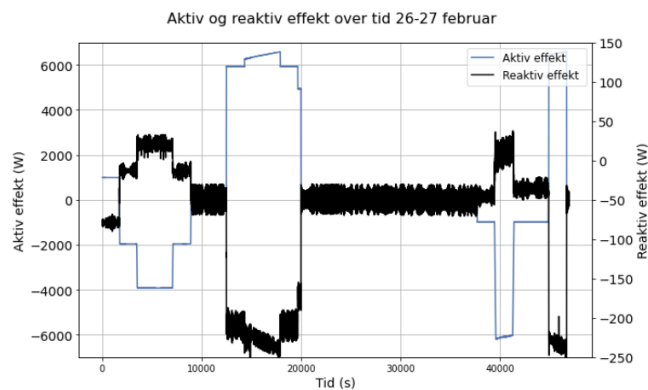
Figur 8-23: Aktiv og reaktiv effekt over tid 16-17 februar



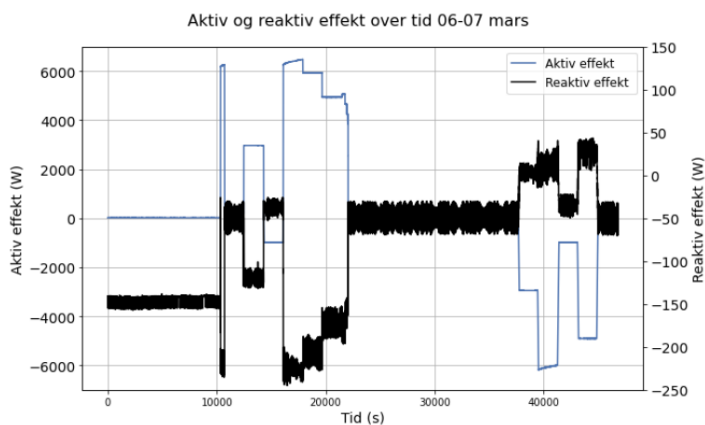
Figur 8-24: Aktiv og reaktiv effekt over tid 18-19 februar



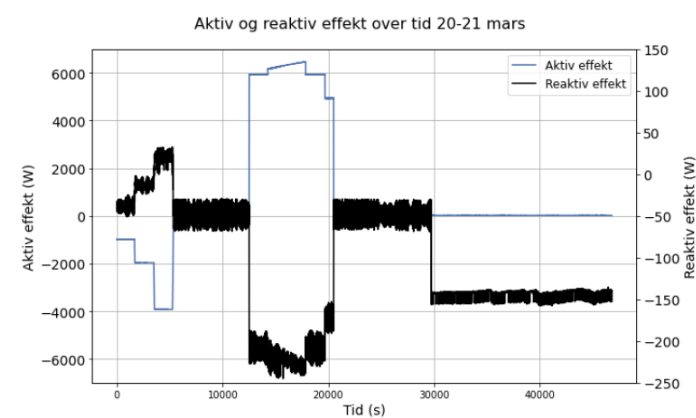
Figur 8-25: Aktiv og reaktiv effekt over tid 20-21 februar



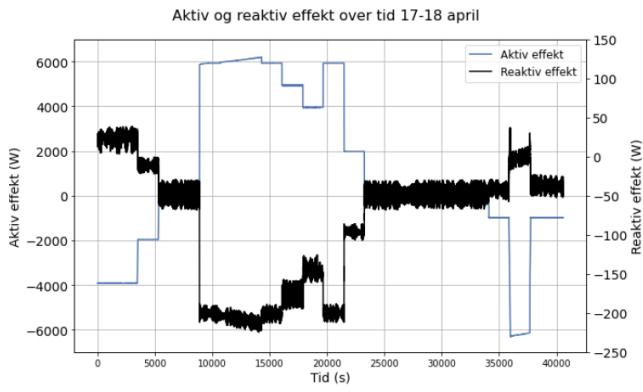
Figur 8-26: Aktiv og reaktiv effekt over tid 26-27 februar



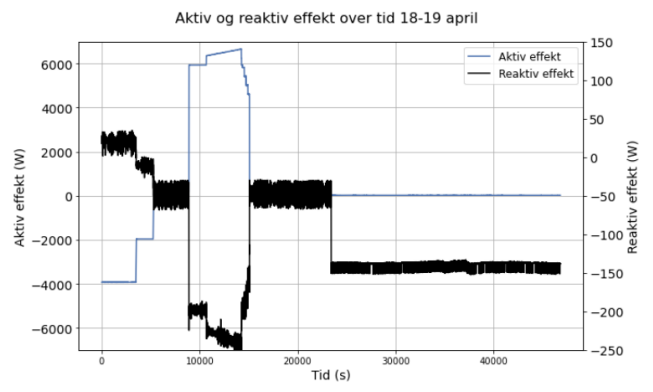
Figur 8-27: Aktiv og reaktiv effekt 06-07 mars



Figur 8-28: Aktiv og reaktiv effekt 20-21 mars



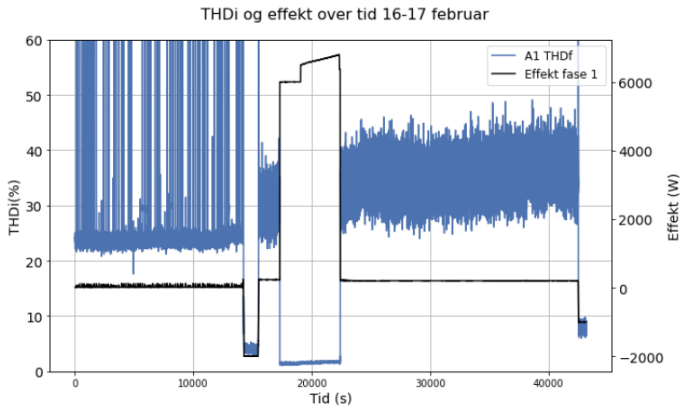
Figur 8-29: Aktiv og reaktiv effekt 17-18 april



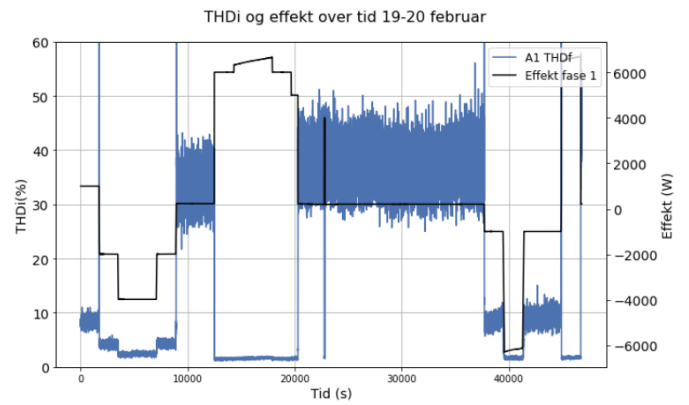
Figur 8-30: Aktiv og reaktiv effekt 18-19 april

Vedlegg D

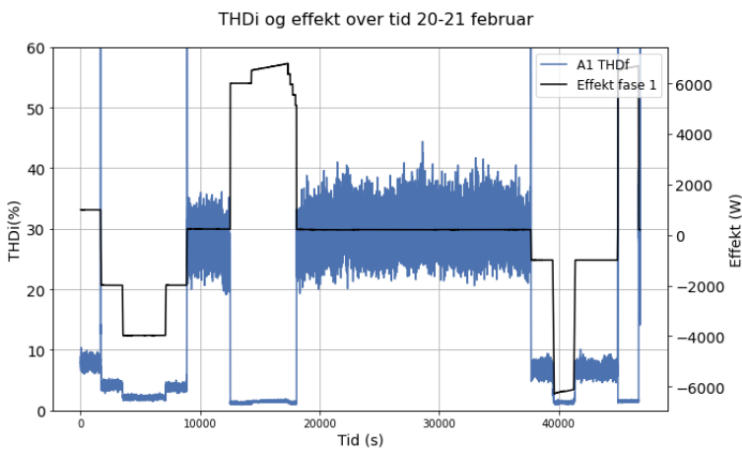
D.1 THDi og effekt med elbil



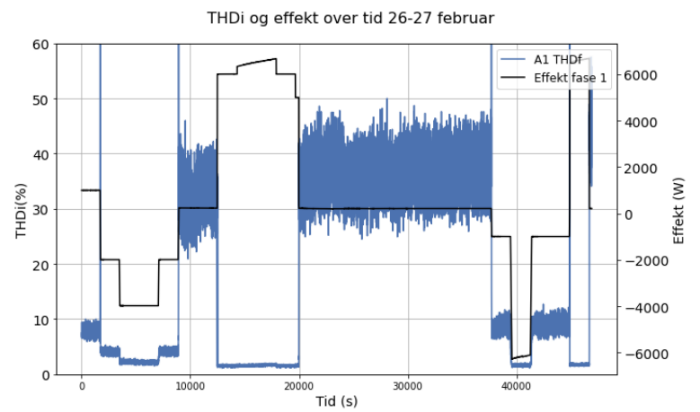
Figur 8-31: THDi og effekt over tid 16-17 februar



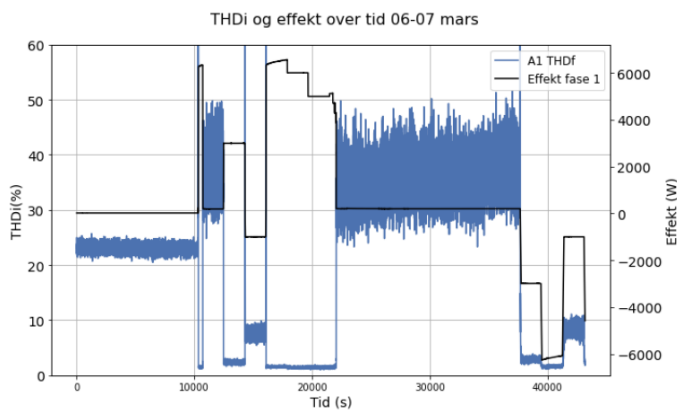
Figur 8-32: THDi og effekt over tid 19-20 februar



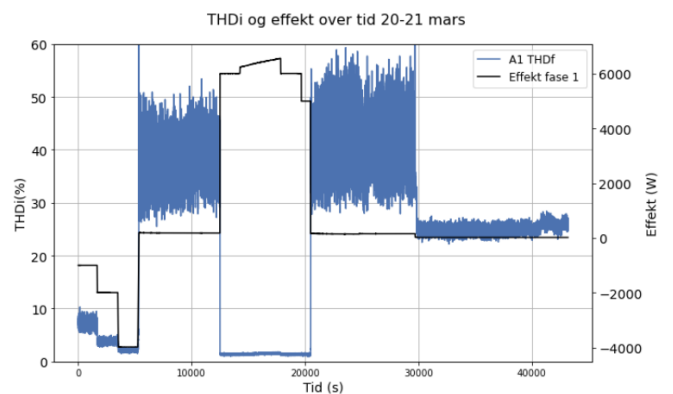
Figur 8-33: THDi og effekt over tid 20-21 februar



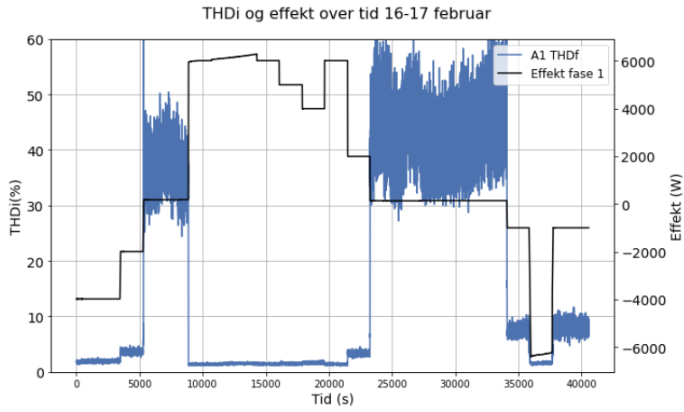
Figur 8-34: THDi og effekt over tid 26-27 februar



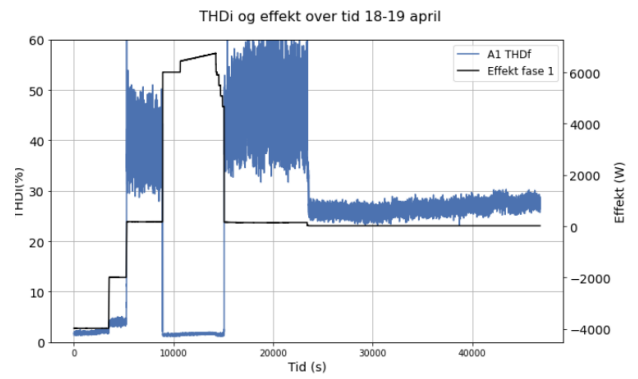
Figur 8-35: THDi og effekt over tid 06-07 mars



Figur 8-36: THDi og effekt over tid 20-21 mars

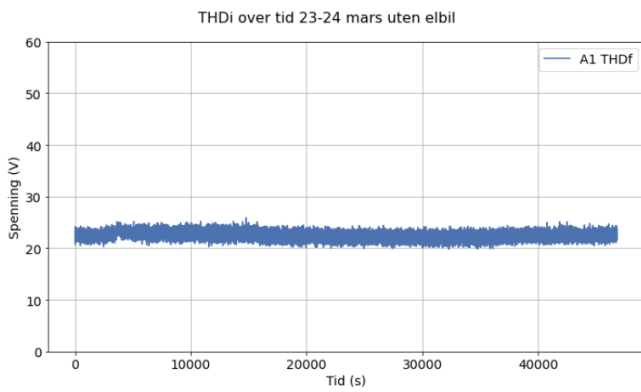


Figur 8-37: THDi og effekt over tid 16-17 februar

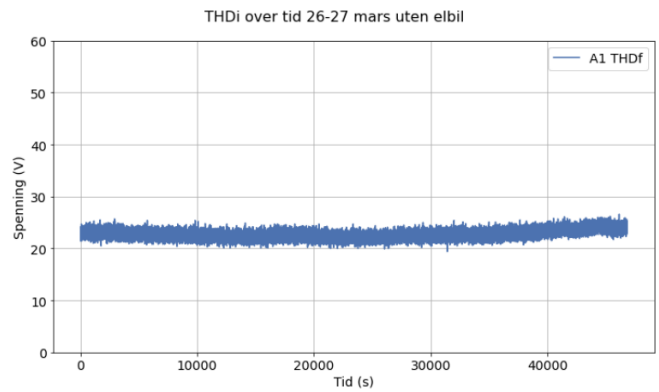


Figur 8-38: THDi og effekt over til 18-19 april

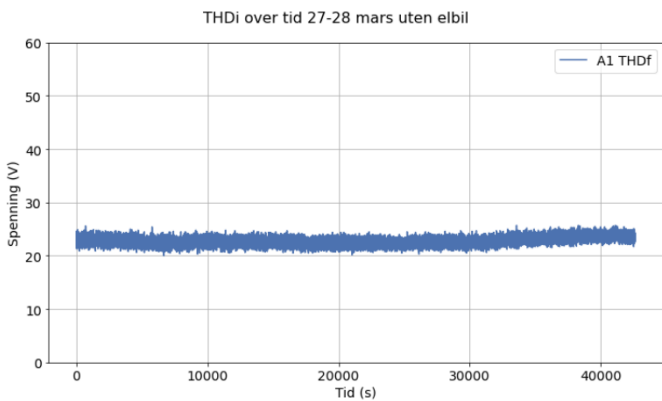
D.2 THDi uten elbil



Figur 8-39: THDi over tid 23-24 mars uten elbil



Figur 8-40: THDi over tid 26-27 mars uten elbil



Figur 8-41: THDi over tid 27-28 mars uten elbil



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway