



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2020 30 stp**  
Fakultet for realfag og teknologi

# **Harmonisering av effekt fra PV- anlegg mot elektriske distribusjonsnett - en litteraturstudie**

Harmonization of power from PV systems to  
electrical distribution networks – a literature review

**Viel Jaren Heitmann**  
Miljøfysikk og fornybar energi

*“We are like tenant farmers chopping down the fence around our house for fuel when we should be using Nature’s inexhaustible sources of energy – sun, wind and tide. ...*

*I’d put my money on the sun and solar energy. What a source of power! I hope we don’t have to wait until oil and coal run out before we tackle that.”*

Thomas Alva Edison i samtale med Henry Ford, 1931

## FORORD

---

Denne masteroppgava ble skrevet høsten 2020 som avslutning av masterprogrammet i Miljøfysikk og fornybar energi ved Fakultet for realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU).

Arbeidet med oppgava har både vært inspirerende og interessant, og jeg sitter igjen med at det store fokuset på å forbedre funksjonen til ulike fornybare energiløsninger for framtida gir fornya håp om at verden kan nå målsettingene om en utslippsfri energisektor i framtida.

Jeg må få rette en stor takk til min veileder, Dr. Heidi S. Nygård, for all veiledning og støtte i arbeidet fra idé til ferdig oppgave.

En takk rettes også til Sigrid og Anne Ma for hjelp til gjennomlesing og språklige vurderinger, og til Kåre Gunnar som har gjort en kjempejobb med å holde motet mitt oppe da arbeidet til tider virka uoverkommelig.

Jeg vil også rette en takk til det lokale elverket, som i innspurten på arbeidet bidro med å synliggjøre viktigheta av god leveringspålitelighet på en helt glimrende måte. I løpet av den siste måneden av masterarbeidet ble hjemmekontoret ramma av langvarige avbrudd i forsyningsspenninga hele fire mandager på rad, med avbruddsvarighet å på inntil en time. Av disse var to planlagte, og to ikke planlagte. I denne korte perioden overstiger dette gjennomsnittet for antall langvarige avbrudd norske strømkunder opplever gjennom et år på 1.7 (per 2017).

Rask konklusjon fra dette er at leveringskvalitet i kraftsystemet er avgjørende for både framdrift og effektivitet.

Sist men ikke minst: Takk til alle som har bidratt til ei flott studietid ved NMBU!

Rollag, 15.12.2020

Viel Jaren Heitmann

## SAMMENDRAG

---

Verden står ovenfor store utfordringer med global oppvarming, og har et stort behov for å kutte klimagassutslipp. Siden de fossile ressursene olje, kull og gass er råstoffet for mesteparten av verdens produksjon av både energi og kraft, trengs det en dreining av energisektoren. De neste tiåra ventes det derfor en betydelig elektrifisering av energibehovet til transport og industri, noe som krever større innslag av kraft fra ikke-regulerbare kilder som blant annet fotovoltaiske solceller (PV). Dette er per 2020 den kraftproduksjonen som øker raskest i omfang på verdensbasis. Også i Norge er det venta en eksplosiv veksten i installert PV-kapasitet framover mot 2030, selv om den norske kraftmiksen fortsatt ventes å være dominert av vannkraft med innslag av vind- og solkraft.

En slik økning av kraft fra PV i kraftnettet bidrar til noen nye utfordringer. Med ikke-regulerbar kraft blir det mer utfordrende å sikre momentan balanse mellom kraftforbruk og kraftproduksjon. Det er også en ny utfordring for operatørene i kraftnettet når kraft nå skal produseres på steder som tidligere kun har stått for forbruk, i tillegg til mulige forstyrrelser i effektkvaliteten.

Det var derfor ønskelig å se på hva slags tekniske løsninger som utvikles for å sikre god harmonisering av effekten fra et PV-anlegg når den skal leveres ut i distribusjonsnettet, og dette ble undersøkt gjennom en litteraturstudie.

Selve litteratursøket ga treff på 56 relevante artikler, og disse ble undersøkt for å se på hvilke utfordringer knytta til effektkvalitet som adresseres. Videre ble det undersøkt hvilke løsninger som foreslås, og det ble gjort en fordypning i et utvalg av disse.

Gjennom litteratursøket slås det fast at artiklene som undersøkes omtaler en rekke utfordringer knytta til effektkvalitet som er relevante for det norske distribusjonsnettet. Blant løsningene som lanseres er det løsninger for både små og store PV-anlegg. Dette kan passe godt til bruk i Norge, siden det er venta at veksten i PV-kvalitet skal fortsette både for små anlegg i tilknytning til boliger, og i større anlegg. I tillegg er det løsninger som kan tas i bruk av nettoperatører.

Løsningene peker på mulige forbedringer av invertere og filtre, og ved bruk av energilagring. Det er naturlig å se for seg at disse løsningene kan brukes i kombinasjon med hverandre, men dette må undersøkes nærmere.

Med bakgrunn i løsningene som er undersøkt, er det grunn til å tro at Norge kan møte framtidens behov for tilstrekkelig effektkvalitet, selv med omfattende utbygging av PV-kapasitet.

## ABSTRACT

---

The world is facing major challenges regarding global warming, and there is a need to reduce emissions from greenhouse gases. Fossil energy sources like oil, coal and gas are used as raw materials for most of the world's production of both energy and power, and this calls for a shift in the world's energy sector. Through the next decades, there is an expectation for a significant electrification of the energy used for transportation and in industry. This will require a greater element of power from renewable energy sources such as photovoltaic solar cells (PV). As of 2020, this is the fastest growing power production worldwide. Also in Norway, an explosive growth in installed PV capacity is expected towards 2030, although the Norwegian power mix is still expected to be dominated by hydropower with elements of wind and solar power.

Such an increase in power from PV in the power grid contributes to some new challenges. With non-regulated power, it becomes more challenging to ensure a momentary balance between power consumption and power production. It is also a new challenge for the operators in the power grid when power is now to be produced in places that have previously only been responsible for consumption, in addition to possible disturbances in the power quality.

It was desirable to look at what kind of technical solutions are being developed to ensure good harmonization of the power from a PV plant when it is to be delivered to the distribution network, and this was investigated through a literature study.

Through the literature review, it is established that the articles examined address a number of challenges related to power quality that are relevant to the Norwegian distribution network. Among the solutions that are launched, both solutions for small scale PV and large PV plants are mentioned. This may well be suitable for use in Norway, since it is expected that the growth in PV capacity will continue both for small scale PV in connection to residential housing, and in larger facilities. In addition, there are solutions that can be used by network operators.

The solutions point to possible improvements of inverters and filters, and the use of energy storage. It is natural to imagine that these solutions can be used in combination with each other, but this must be investigated further.

Based on the solutions that have been investigated, there is reason to believe that Norway can meet the future needs for sufficient power quality, even with extensive development of PV capacity.

# INNHold

---

Forord .....	II
Sammendrag .....	III
Abstract .....	IV
Innhold .....	1
Forkortelser .....	3
Symboler.....	4
1 Introduksjon .....	5
1.1 Bakgrunn og inspirasjon .....	5
1.2 Problemstilling og inndeling av oppgava.....	7
2 Elektrisitet – en introduksjon .....	8
2.1 Likestrøm og vekselstrøm.....	8
2.2 Fysiske størrelser i et vekselstrømsystem .....	9
3 Det norske kraftsystemet.....	13
3.1 Kraftproduksjon og -forbruk i Norge i dag .....	13
3.2 Det norske kraftnett, nettoperatører og markeder.....	15
3.3 Leveringskvalitet i kraftsystemet.....	17
3.4 Balansemarkeder og frekvensregulering.....	20
3.5 Overføringskapasitet i kraftnett.....	21
4 Solkraft som elektrisitetskilde .....	22
4.1 Utbredelse av solkraft i verden og i Norge.....	22
4.2 PV i kraftmarkedet – Norge og Europa mot 2040 .....	24
4.3 Utforming av PV-anlegg.....	26
5 Litteraturstudie: Metode.....	31
5.1 Litteratursøk .....	31
5.2 Fordypning i litteratur .....	34
6 Litteratursøk: Harmonisering av effekt fra PV-anlegg .....	35
6.1 Generelt om artiklene i litteratursøket .....	35
6.2 utfordringer adressert.....	38
6.3 Harmoniseringsløsninger i litteratursøket.....	39
7 Fordypning i løsninger .....	40

7.1	Invertere .....	40
7.2	Filter.....	43
7.3	Energilagring.....	45
7.4	Diverse løsninger - Sanntidsberegning.....	49
8	Diskusjon og vurderinger .....	52
8.1	Litteratursøk .....	52
8.2	Fordypning i løsninger .....	55
9	Konklusjon .....	57
9.1	Videre studier .....	58
	Referanser .....	59
	Vedlegg A: Artikler i litteratursøket .....	64

---

## FORKORTELSER

---

AC	Alternating current (Vekselstrøm)
aFRR	Automatic fast frequency reserves (sekundærreserver)
AI	Artificial Intelligence (kunstig intelligens)
AMS	Avansert måle- og styringssystem (Automatisk strømmåler)
DC	Direct current (Likestrøm)
DFIG	Doubly fed induction generator
DSO	Distribution system operator (Distribusjonssystemoperatør)
DVR	Dynamic voltage restorer (Dynamisk spenningsgjenoppretting)
EL	Elektrolyse
FACTS	Flexible AC transmission system (Fleksibelt AC kraftsystem)
FC	Fuel cell (brenselcelle)
FCR	Frequency containment reserve (primærreserver)
FLC	Fuzzy logic controller
FN	Forente Nasjoner
FoL	Leveringskvalitetsforskriften
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
HPF	High pass filter
IT	Insulated terra
LV	Low voltage (Lavspent)
KILE	Kvalitetsjusterte inntektsrammer ved ikke-levert energi
mFRR	Manual fast frequency reserves (tertiærreserver, regulerkraft)
MPPT	Maximum power point tracking
NMBU	Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
PI	Proportional integral (proporsjonale integraler)
PLL	Phase locked loop
PV	Photovoltaic (Fotovoltaisk)
PWM	Pulse width modulation (Pulsbreddemodulasjon)
RME	Reguleringsmyndigheten for energi
SCCS	Sinusoidal current control strategy (sinusforma strømkontrollstrategi)
SC	Supercapacitor (superkondensator)
SD	Science Direct
SoC	State of charge
SRP	Scenario recognizable preselection (forhåndsdefinerte gjenkjennbare situasjoner)
STATCOM	Static synchronous compensator (Statisk synkronkompensator)
THD	Total harmonic distortion (Total harmonisk forvrengning)
TN	Terra neutral
TSO	Transmission system operator (Transmisjonssystemoperatør)
VSI	Voltage source inverter



## SYMBOLER

Symbol	Størrelse, definisjon	Benevning
$C$	Kapasitans (kondensator)	F
$E$	Energi	J, kWh
$f$	Frekvens	Hz
$I$	Strøm	A
$I_{max}$	Strøm, maksimalverdi for AC	A
$I_{rms}$	Effektivverdi strøm	A
$L$	Induktans (spole)	H
$U$	Spenning	V
$U_{fase}$	Fasespenning	V
$U_{linje}$	Linjespenning	V
$U_h$	Harmonisk spenningskomponent for harmonisk grad $h$	V
$U_{ij}$	Grunnharmonisk komponent, linjespenning mellom fase $i$ og $j$	V
$U_{max}$	Spenning, maksimalverdi for AC	V
$U_{rms}$	Effektivverdi spenning	V
$U_1$	Grunnharmonisk komponent, spenning	V
$U_-$	Negativ komponent, linjespenning	V
$U_+$	Positiv komponent, linjespenning	V
$P$	Aktiv effekt (effekt)	W
$P_{st}$	Korttidsintensitet for flimmer	pu
$P_{lt}$	Langtidsintensitet for flimmer	pu
$R$	Motstand (resistans)	$\Omega$
$S$	Tilsynelatende effekt	VA
$t$	Tid	s
$T$	Periode	s
$Q$	Reaktiv effekt	Var
$\Delta U_{stasjonær}$	Stasjonær spenningsendring under spenningsavvik	V
$\Delta U_{maks}$	Maksimal spenningsdifferanse under spenningsavvik	V
$\omega$	Vinkelfrekvens	rad per s
$\phi$	Faseforskyvning	rad

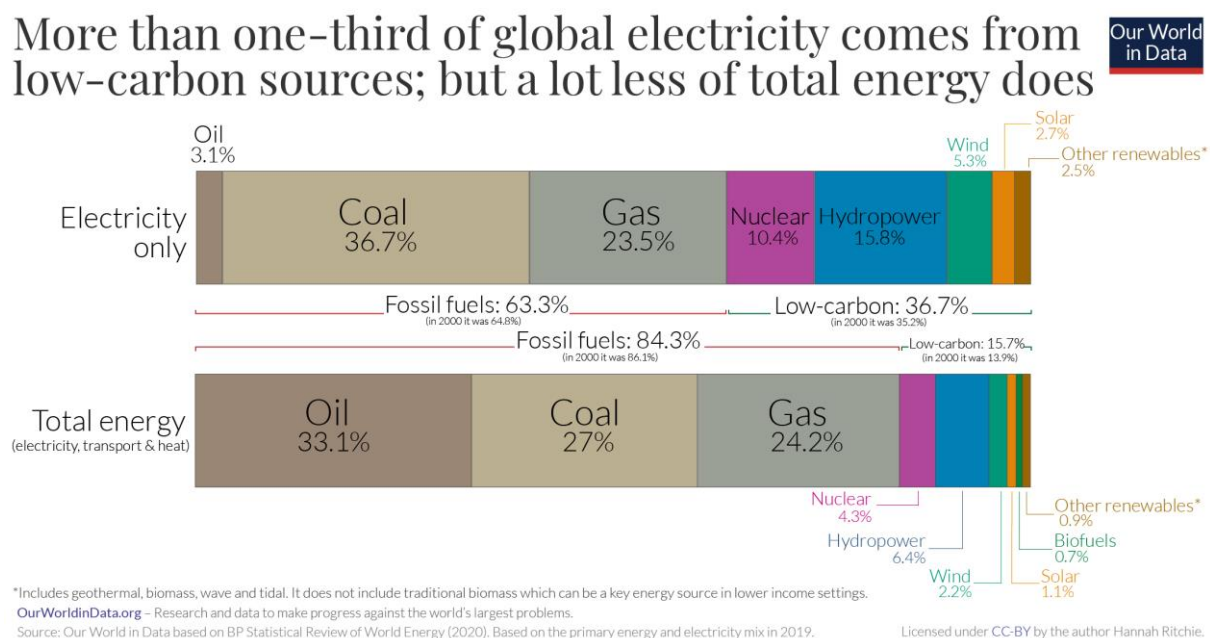
# 1 INTRODUKSJON

## 1.1 BAKGRUNN OG INSPIRASJON

«FNs bærekraftsmål er verdens felles arbeidsplan for å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030»

I bærekraftsmåla peker verdens Forente Nasjoner (FN) ut noen av de viktigste utfordringene verden står ovenfor, og strategier for å håndtere disse. Videre har FNs klimapanel slått fast at om verden skal nå målsettingen om å stoppe klimaendringene og holde den globale oppvarminga under 1,5 grader celsius, må verdens klimagassutslipp reduseres med 40-50% innen 2030, sammenlikna med 2010. Videre er målet at verdens netto utslipp av klimagasser skal være null innen 2050. Det betyr å enten ha kutta alle utslipp, eller kompensere gjennom karbonfangst, og på denne måten bli karbonnøytral. [1] [2]

Til tross for verdens ambisiøse målsettinger fortsetter verdens klimagassutslippa å øke, og i 2016 bidro verdens energibehov med hele 73,2% av de globale utslippa. Figur 1.1 viser at henholdsvis 84,3% og 63,3% av verdens produksjon av energi og elektrisk kraft per 2019 er basert på de fossile råvarene olje, kull og gass. Skal verdens målsettinger om utslippskutt nås, kreves det derfor en storstilt dreining mot energi- og kraftproduksjon basert på råvarer med lave klimagassutslipp. [3] [4]



Figur 1.1 Kilder til verdens energi- og elektrisitetsproduksjon per 2019. Fra [4].

«Solkraft er den kraftproduksjonsteknologien som vokser raskest i verden»

Dette slår Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) fast i rapporten *Analyse og framskriving: Kraftproduksjon i Norden til 2040*, og viser samtidig til at installert kapasitet for fotovoltaiske solceller («photovoltaics», PV) tilknyttet kraftnettet i Norge har hatt stor vekst i perioden 2015-2019. Dette henger tett sammen med at prisen på PV-moduler har falt i den samme perioden. Det er også venta at veksten fortsetter framover mot 2040, og at inntil 15% av alle eneboliger og 20% av alle næringsbygg vil kunne ha installert PV-anlegg i 2040. [5] [6]

Denne framveksten av solkraft, sammen med annen ikke-regulerbar kraft som vind, bidrar til utfordringer for kraftsystemet i Norge.

Det er flere åpenbare grunner til det. Den første handler om at økt innblanding av ikke-regulerbar kraft gjør det vanskeligere å balansere kraftforbruk og –produksjon til enhver tid, som igjen påvirker reguleringa av frekvensen i kraftnettet.

Den neste handler om PV-anleggs evne til å levere effekt med egenskaper som harmonerer med egenskaper ved effekten ute i kraftnettet, og slik unngår spenningsforstyrrelser. Til slutt handler dette også om at framveksten av PV-anlegg i Norge bidrar til at det produseres kraft på steder det tidligere kun har vært kraftforbruk, og på den måten endrer hele premisset for hvordan kraftnettet er bygd ut.

## 1.2 PROBLEMSTILLING OG INNDELING AV OPPGAVA

Med den voldsomme utviklinga i utbredelse av nettilknytt PV både i Norge og i verden, er det naturlig å anta at det også skjer en stor utvikling på ulike tekniske løsninger for å løse utfordringene dette kan bidra til.

Det var derfor ønskelig å undersøke problemstillinga:

*Kan Norge møte framtidens behov for tilstrekkelig effektkvalitet i distribusjonsnett med økt innblanding av nettilknytt PV-anlegg?*

For å få en oversikt på oppdatert forskning på fagfeltet ble det gjennomført et litteratursøk i databaser med forskningsartikler for å belyse spørsmålet:

*Hvilke tekniske løsninger utvikles for å sikre harmonisering av effekten levert fra PV-anlegg mot det elektriske distribusjonsnett?*

Litteratursøket ble definert for å omfatte artikler som tok for seg kvalitetsmessige utfordringer ved PV tilknytt distribusjonsnett i perioden 2015-2020. Det ble gjort en kartlegging av ulike effektutfordringer som er omtalt, og de ulike løsningene fra søket ble sortert etter om de er utforma for solkraftverk (over 100 kW) eller mindre PV-anlegg.

Videre ble det gjort en fordypning i et utvalg ulike løsninger fra litteratursøket, og de ulike løsningene fra litteratursøket og -fordypningen ble vurdert for om de er egna til bruk i Norge.

Oppgava innledes med teoretisk bakgrunn for litteraturstudien. Kapittel 2 omhandler en introduksjon til elektrisitet med nødvendige størrelser og begrep, før kapittel 3 tar for seg det norske kraftsystemet, med de ulike kvalitetskrava som stilles til dette. Videre omhandler kapittel 4 solkraft som elektrisitetskilde, med oversikt over eksisterende løsninger for å koble PV-anlegg til distribusjonsnett, samt framtidsutsikter for PV i Norge og Europa

Kapittel 5 tar for seg metode og ytterligere avgrensninger for litteratursøk og fordypning, før kapittel 6 presenterer resultatet av litteratursøket og kapittel 7 tar for seg fordypninga.

I kapittel 8 er det gjort en vurdering av problemstillinga, ved å vurdere de skisserte løsningene fra litteraturstudien opp mot utfordringene forventa i det elektriske distribusjonsnett med økt innslag av solkraft i den norske kraftproduksjonen, før kapittel 9 tar for seg konklusjoner, oppsummering og forslag til videre arbeid.

## 2 ELEKTRISITET – EN INTRODUKSJON

---

Elektrisitet er den fysiske læra om ladde partikler og fenomener knytta til disse. For å kunne forstå produksjon av kraft og hvordan et kraftsystem fungerer, er det behov for grunnleggende begrep og fysiske størrelser som her gjennomgås.

### 2.1 LIKESTRØM OG VEKSELSTRØM

I elektriske systemer skilles det mellom likestrøm (Direct current, DC) og vekselstrøm (Alternating Current, AC).

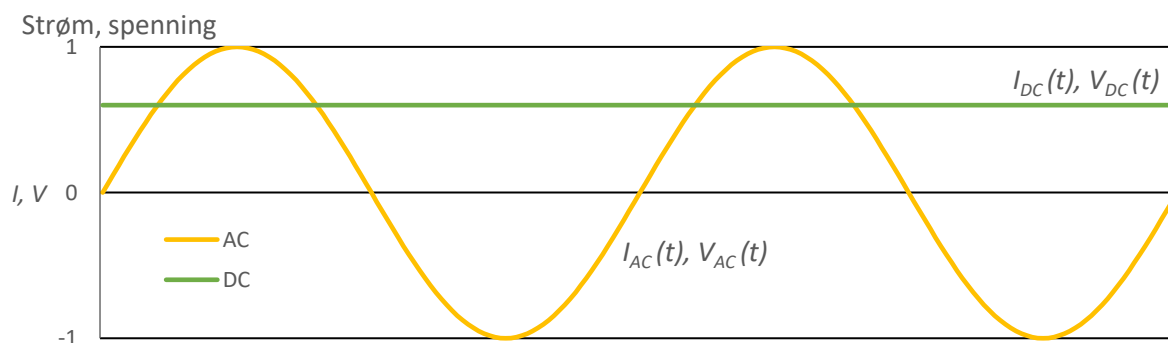
DC er elektrisk strøm i én retning, og brukes ofte for å omtale en konstant strømning. Den brukes blant anna i forbindelse med batterier, som lades opp ved en strøm inn i batteriet, og tappes med en strøm ut, eller i industrielle prosesser, som i produksjon av aluminium. [7]

Vekselstrøm er elektrisk strøm som periodisk skifter retning, og på den måten transporterer like mye strøm i hver retning av en leder. AC er mer utbredt enn DC til bruk i energiforsyning gjennom kraftnett, og brukes også til drift av mange motorer og apparater. [8]

Spenning, eller elektrisk potensial, for et punkt er energien som kreves for å forflytte en ladning fra et nullpunkt (der ladningen har null potensiell energi) til punktet, og slik tilføre potensiell energi. Spenning mellom to punkter er differansen i elektrisk potensial, og fungerer på den måten som driveren for å forflytte strøm rundt i en krets. Denne måles i volt, [V]. [9]

I et elektrisk system vil spenningen henge tett sammen med hvordan strømmen oppfører seg med hensyn til tid. Dette er vist for AC og DC i Figur 2.1.

Her er strømmen og spenningen for et DC-system konstant, og et AC-system er representert ved en sinuskurve. Dette er den vanligste tilnærminga for å beskrive strømmen og spenninga, selv om kurva i realiteten ikke vil være så jevn, men påvirkes av forstyrrelser og ujevnheter.



Figur 2.1 Skisse som viser hvordan strøm ( $I$ ) og spenning ( $V$ ) svinger for AC, og er konstant for DC.

Både AC og DC kan distribueres gjennom et kraftnett, og ved hjelp av omformere kan DC gjøres om til AC, og motsatt.

## 2.2 FYSISKE STØRRELSER I ET VEKSELSTRØMSYSTEM

### 2.2.1 Energi:

Energi er evnen til å utføre arbeid, det vil si når en kraft påvirker et objekt, som når noe løftes opp, eller en motor driver noe rundt. Potensiell energi brukes om energi som er lagra og kan frigis, for eksempel energien i vann magasinert i et vannkraftverk eller energi lagra i et batteri. Energi oppgis i joule, [J], mens elektrisk energi betegnes med kilowattimer [kWh]. [10]

Elektrisk energi kan også omtales som elektrisk kraft, og i denne oppgava brukes begrepet kraft om all produksjon og distribusjon av elektrisk energi eller elektrisitet. Begrepet energi brukes når det er snakk om en mer teoretisk tilnærming, og ved løsninger for lagring av elektrisk energi, for eksempel i batterier.

### 2.2.2 Frekvens:

Frekvensen,  $f$ , er et mål for hvor mange ganger et fenomen gjentar seg over en tidsperiode, for eksempel hvor mange ganger elektrisk vekselspanning svinger per sekund, eller antall omdreininger og oppgis i hertz, [Hz].

Frekvensen  $f$  avhenger perioden,  $T$ , som er tida mellom to hendelser inntreffer. Vinkelfrekvensen,  $\omega$ , uttrykker rotasjonshastighet, og brukes blant anna om svingningene i en sinuskurve. Sammenhengen mellom disse tre er vist i formel 1:

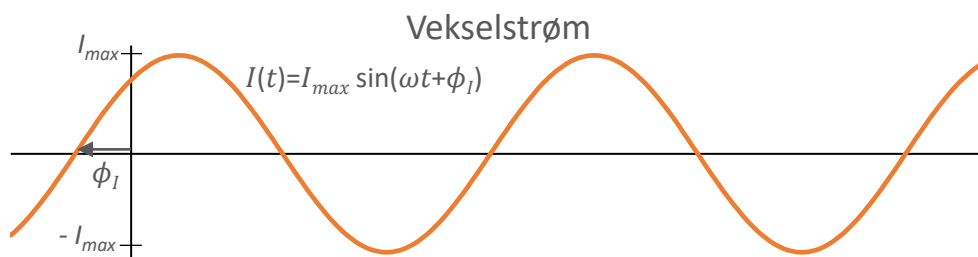
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}. \quad (1)$$

### 2.2.3 Vekselstrøm

Siden vekselstrøm representeres ved en sinuskurve, kan den uttrykkes ved hjelp av formel 2:

$$I(t) = I_{max} \sin(\omega t + \phi_I), \quad (2)$$

der strømmen til enhver tid er  $I(t)$ ,  $I_{max}$  er strømmens amplitude eller maksverdi,  $\omega$  er vinkelfrekvens,  $t$  er tida, og  $\phi_I$  eventuell faseforskyvning, som vist i Figur 2.2. [11]



Figur 2.2: Sinuskurve som beskriver vekselstrøm,  $I(t)$ , maksstrømmen  $I_{max}$ , og faseforskyvning  $\phi_I$ .

## 2.2.4 Vekselspenning

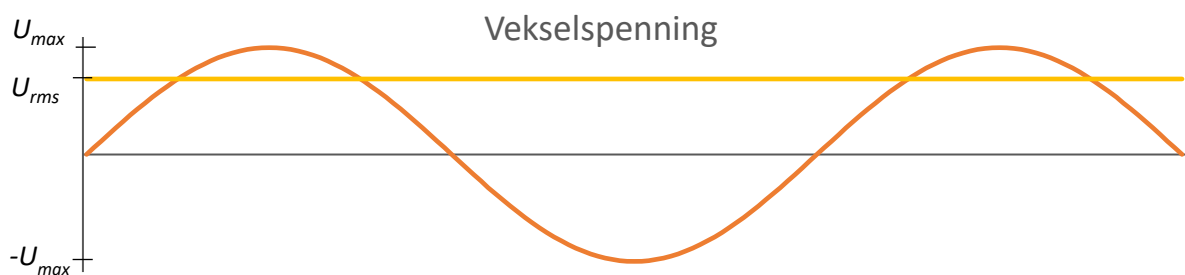
Som for strøm, kan spenninga til enhver tid,  $V(t)$ , beskrives ved hjelp av formel :

$$U(t) = U_{max} \sin(\omega t + \phi_V) , \quad (3)$$

der  $U_{max}$  er spenningas maksimalverdi,  $\omega$  er vinkelfrekvens,  $t$  er tida, og  $\phi_V$  eventuell faseforskyvning. I tillegg er det hensiktsmessig å omtale spenningas effektivverdi,  $U_{rms}$ , som beskriver virkninga av en varierende verdi. Denne er uttrykt ved formel 4:

$$U_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{max} = 0,707 U_{max} , \quad (4)$$

der  $U_{max}$  er spenningas maksimalverdi. Sammenhengen mellom de to er vist i Figur 2.3



Figur 2.3: Skisse som viser forholdet mellom spenningas maksimalverdi  $U_{max}$  og effektverdi  $U_{rms}$ .

Når vi i Norge betegner forsyningsspenning på 230 V, er dette spenningas effektverdi, mens maksimalverdien er 325 V.

## 2.2.5 Kompleks effekt

### 2.2.5.1 Reaktiv effekt, $Q$ :

I denne oppgava er begrepet effekt brukt om den fysiske størrelsen aktiv effekt, som er den nyttige komponenten i et kraftsystem med formål å kunne drive laster. I tillegg til denne reelle størrelsen, finnes det en imaginær komponent, kalt reaktiv effekt,  $Q$ , som er uvirksom effekt som svinger fram og tilbake i kraftsystemet uten å kunne omsettes til virksomt arbeid.

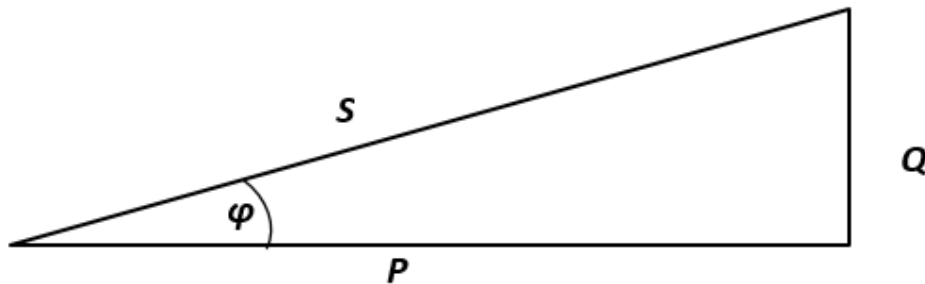
### 2.2.5.2 Tilsynelatende effekt, $S$ :

Tilsynelatende eller kompleks effekt,  $S$ , består av den reelle komponenten aktiv effekt,  $P$ , og den imaginære komponenten reaktiv effekt,  $Q$ . Denne måles i voltampere, [VA].

I et vekselstrømsystem er den tilsynelatende effekten produktet av den effektive strømmen,  $I_{rms}$ , og effektive spenninga,  $U_{rms}$ , som vist i formel 5:

$$S = I_{rms} U_{rms} . \quad (5)$$

Videre brukes effekttrekanten i Figur 2.4 for å illustrere sammenhengen mellom tilsynelatende, aktiv og reaktiv effekt, og faseforskyvninga,  $\phi$ , mellom  $P$  og  $Q$ . [11]



Figur 2.4 Effekttrekanten illustrerer sammenhengen mellom aktiv effekt,  $P$ , reaktiv effekt  $Q$ , faseforskyvninga mellom dem,  $\phi$  (her markert som  $\varphi$ ) og tilsynelatende effekt,  $S$ . Basert på [12].

### 2.2.5.3 Beregning av aktiv og reaktiv effekt

Basert på effekttrekanten følger det at aktiv effekt,  $P$ , og reaktiv effekt,  $Q$ , kan beregnes ved formel 6 og formel 7 : [11]

$$P = I_{rms}U_{rms} \cos \phi , \quad (6)$$

$$Q = I_{rms}U_{rms} \sin \phi . \quad (7)$$

#### *Effekt i et DC-system*

I et DC-system eksisterer ikke reaktiv effekt, og effekten,  $P$ , kan beregnes ut fra den jevne strømmen,  $I$ , spenninga,  $U$ , og  $\cos \phi = 1$ , siden faseforskyvninga er 0.

### 2.2.5.4 Effektfaktor

For å definere forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt i et system brukes begrepet effektfaktor, som er definert som  $\cos \phi$ . Det er ønskelig at denne er tilnærma 0, noe som betyr at systemet har fravær av reaktiv effekt. [12]

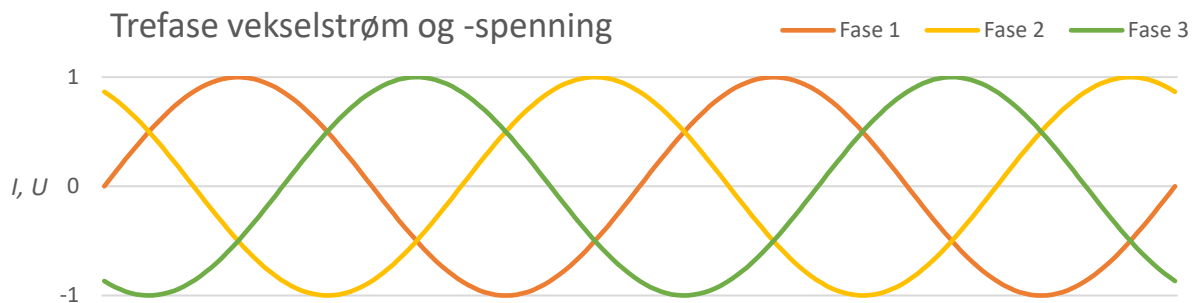
### 2.2.6 Kraftnett med ulike faser

Vekselstrømmen som er omtalt hittil er basert på ett sinusforma signal, og er av typen enfase. I kraftnettet foregår tilnærma all kraftoverføring ved trefase vekselspenning, der de tre fasene er skjøvet  $120^\circ$  i forhold til hverandre som illustrert i Figur 2.5.



For trefase spenning oppgis linjespenninga,  $U_{linje}$ , som proporsjonal med spenninga i hver av de tre fasene,  $U_{fase}$ , som vist i formel 8: [13]

$$U_{linje} = \sqrt{3}U_{fase} . \quad (8)$$



Figur 2.5: Illustrasjon av trefase vekselstrøm og vekselspenning

I Norge er vanlig spenning levert til husstander enfase vekselspenning med 230 V. For bruk i for eksempel industribygg eller til å drive større maskiner leveres krafta gjerne i trefase, og da med linjespenning 400 V.

Logikken bak å bruke tre faser baserer seg på at det trengs to ledere for å slutte en krets. I DC-systemer kan jording brukes som retur gjennom at overskuddsstrøm ledes til bakken, mens dette fungerer dårlig i AC-system.

Ved å bruke tre ledninger A, B, C ut fra en generator sammen med en felles returledning, vil summen av strømmene i A, B og C alltid være null. Dette gjelder så lenge de er faseforskjøvet med  $120^\circ$ , og har jevn belastning i både størrelse og effektfaktor på de tre fasene. Det vil likevel alltid være noe ubalanse mellom fasene, men returstrømmen som følge av dette kan håndteres med bruk av enten returledning eller jording. [13]

Hvordan dette er løst, varierer mellom ulike typer nettsystemer, og utforminga av det norske kraftnettet er omtalt nærmere i kapittel 3.2.

Ved å transportere kraft med høy trefase vekselspenning i overføringsnettet, kan mer effekt overføres med færre ledninger og mindre tap. I tillegg gir trefase stabile driftsforhold for motorer, som dermed kan bygges enklere, men fortsatt være robuste, enn om de skulle operere på spenning fra en- eller to faser. [14]

## 3 DET NORSKE KRAFTSYSTEMET

---

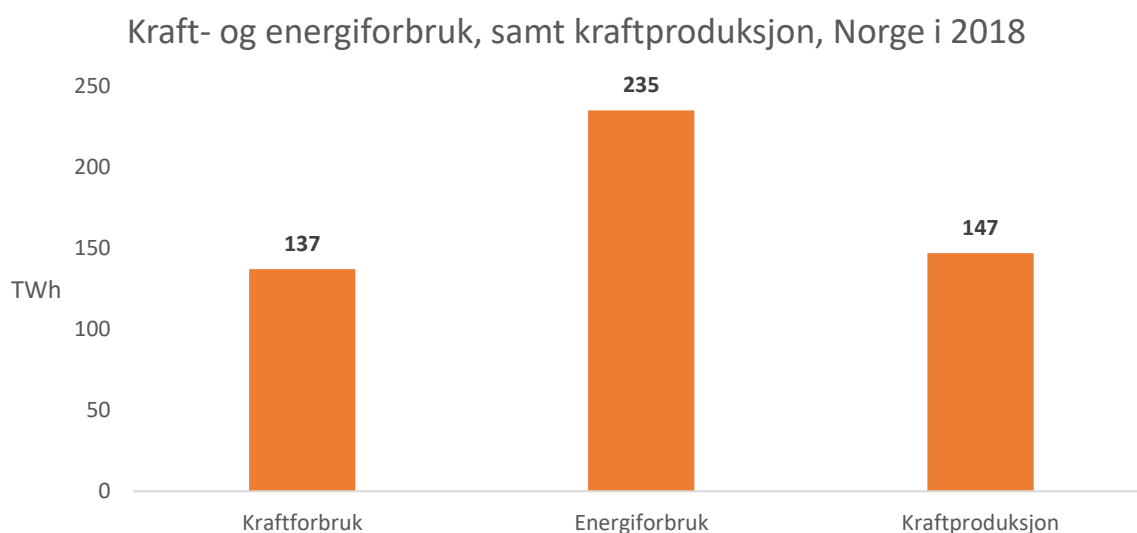
Et enkelt elektrisk kraftsystem består av tre hovedkomponenter: kraftproduksjon, transport, og forbruk. I tillegg kan det inngå enheter for energilagring, digital infrastruktur for å overvåke og regulere kraftsystemet, samt løsninger for bedre samspill mellom produksjon, forbruk og andre tilgrensende kraftsystemer. [15]

Her følger først en oversikt på produksjon og forbruk av kraft i Norge per 2018. Videre gis det en oversikt over det norske kraftsystemet, med en beskrivelse av kraftnettet, nettoperatører og kraftmarkeda som påvirker kraftflyten i Norge.

Videre gjøres det en gjennomgang av ulike utfordringer for kraftsystemet, med dagens regelverk for leveringskvalitet, balansemarked for frekvensregulering, og avslutningsvis en oversikt over faktorer som spiller inn på overføringskapasiteten i kraftnettet.

### 3.1 KRAFTPRODUKSJON OG -FORBRUK I NORGE I DAG

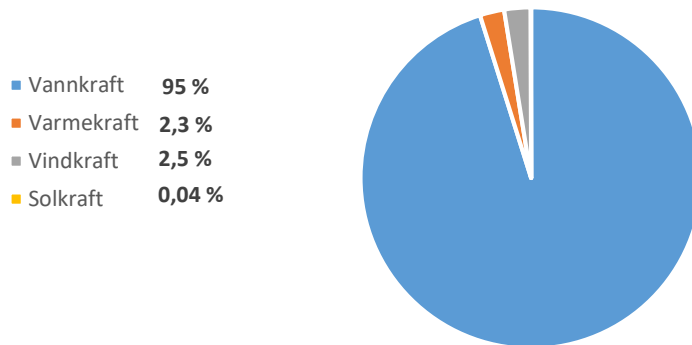
I 2018 var det kraftforbruket i fastlands-Norge 137 TWh, mens det totale energiforbruket var på 235 TWh. Til sammenlikning var den elektriske kraftproduksjonen på 147 TWh, som vist i Figur 3.1.



Figur 3.1: Kraftforbruk, energiforbruk og kraftproduksjon i Norge i 2018.

Av dette stod vannkraft for 95% av produksjonen, og varmekraft og vindkraft henholdsvis 2,3% og 2,5%. Selv om den totale installerte PV-effekten har vokst raskt i Norge siden 2015, var bidraget til den norske solkraftproduksjonen svært beskjedent, og utgjorde bare 0,058 TWh i 2018. Forholdet mellom de ulike kraftproduksjonene er vist i Figur 3.2. [16] [17]

### Fordeling av kraftproduksjonen, 2018



Figur 3.2 Fordeling av kraftproduksjonen i Norge i 2018 etter råvare. Solkraft er her neglisjerbart.

Utviklinga av installert PV-vekst i Norge og i verden de siste åra, samt framtidsutsikter mot 2040 omtales videre i kapittel 4.

Siden strøm er ferskvare som må brukes i samme øyeblikk som den produseres, må også produksjonen tilsvare forbruket, slik at kraftsystemet er i momentan balanse. Dette gjør at det er naturlig å skille mellom regulerbar og ikke-regulerbar kraftproduksjon. Solkraft og vindkraft er ikke-regulerbare kraftproduksjoner som må utnyttes når råvaren (sollys, vind) er tilgjengelig, mens mye av vannkrafta er regulerbar. Det innebærer at potensiell energi kan lagres ved at vann demmes opp og magasineres, slik at produksjonen av kraft kan skje på et senere tidspunkt. [18]

En del varmekraftverk er også basert på ressurser som kan lagres. I disse genereres kraft ved at varme frigjøres i en forbrenningsprosess, og vandndamp eller forbrent gass driver en turbin eller et stempel. Slike varmekraftverk kan drives ved forbrenning av avfall, fossile ressurser som olje, kull og gass, eller basert på kjernekraft – selv om sistnevnte oftest omtales som en egen type kraftverk.

Selv om varmekraft er regulerbare i den forstand at energibæreren kan lagres, er det stor forskjell i om de er egna for rask justering av kraftproduksjonen. Kjernekraftverk og varmekraftverk basert på olje og kull er lite egna til raske svingninger i produksjonen, mens gasskraftverk lettere lar seg regulere raskt, og dermed kan bidra i balansering av kraftmarkedet.

Gjennom bruk av vannmagasiner har Norge lagringskapasitet for produksjon til 70% av det årlige kraftforbruket, noe som tilsvarer omtrent halvparten av Europas magasinkapasitet. [18]

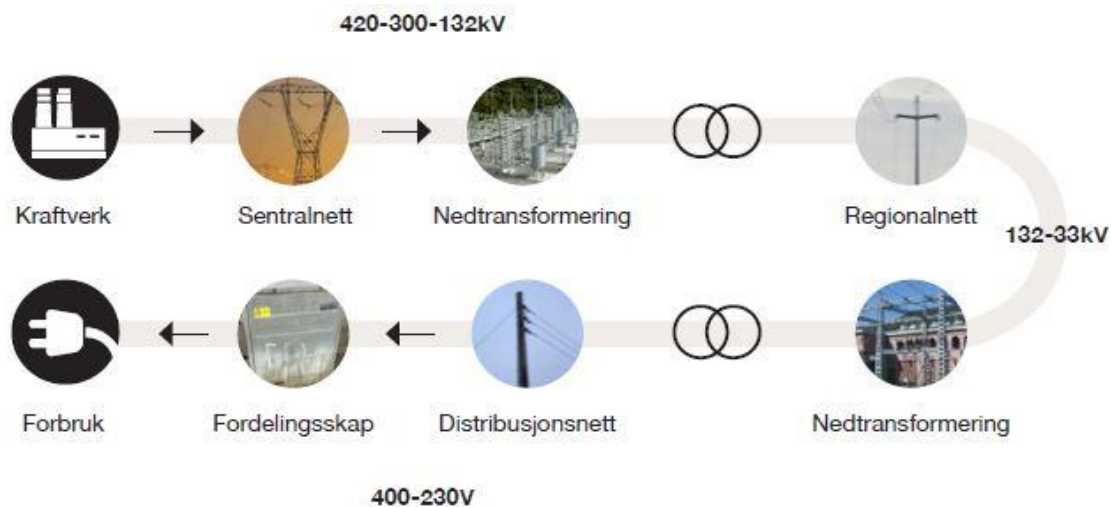
Muligheten for å lagre og raskt sette i gang produksjon av vannkraft, gjør det norske systemet veldig stabilt og vannkrafta verdifull ikke bare for Norge, men også det europeiske kraftsystemet, som vi er tett tilknytt. Dette omtales i neste delkapittel.

## 3.2 DET NORSKE KRAFTNETTET, NETTOPERATØRER OG MARKEDER

Det norske kraftnettets består av tre ulike nivåer [15]:

1. Sentralnettet står for transport av strøm med høy spenning («high voltage, HV) transportert over store avstander, for eksempel mellom landsdeler eller mellom ulike land.
2. Regionalnettet knytter sammen sentralnettet og distribusjonsnettet.
3. Distribusjonsnettet sikrer kraftforsyning med lav spenning («low voltage», LV) ut til forbrukere.

Figur 3.3 viser de tre nivå i kraftnettets, sett i sammenheng med kraftproduksjon og forbruk.



Figur 3.3: Oversikt over det norske kraftnettets, med produksjon og forbruk av kraft. Henta fra [15].

### 3.2.1 Kraftnettets

Det norske kraftnettets baseres på sinusforma trefase AC, som forklart i kapittel 2.2.6.

For overføring av kraft over store avstander brukes HV, som gjør det mulig å overføre mye kraft med lav strøm slik at lite effekt tapes i linjene. Deretter transformeres spenninga ned til LV i distribusjonsnettet. Linjene som benyttes til LV er betydelig tynnere og enklere, siden overføringskapasiteten er svært forskjellig. I tillegg er det mindre risiko for omfattende skader ved kontakt med LV sammenlikna med HV.

Det er også nevnt at det finnes ulike systemer for bruk av jording og nøytralleder. I Norge er det vanligste distribusjonsnettet av typen «insulated terra» (IT), der faselederne og nøytralpunktet er isolert fra jord med overspenningsvern. I dette nettet har sluttbrukerne kun tilgang på enfase 230 V spenning. Nyere distribusjonsnett som bygges ut er av typen «terra neutral» (TN), og eldre IT-nett bygges også om til TN. Her føres det et nullpunkt fram til sluttbrukerne, og avhengig av om energi hentes ut mellom fasene eller mellom en fase og nøytral, kan sluttbrukerne ha tilgang på både enfase 230 V og trefase 400 V spenning. [13]

### 3.2.2 Nettoperatører og ansvarsfordeling

Ansvar for utbygging og drift av det norske kraftnettet er basert på monopolvirksomhet med konsesjoner tildelt aktører innenfor de ulike delene av nettet. [19]

I Norge er Statnett tildelt rolla som transmisjonssystemoperatør (Transmission system operator, TSO). I dette ligger ansvaret for drift og utbygging av sentralnettet, å sikre koordinering av energimarkedet mot utlandet, samt et overordna ansvar for driftssikkerheten i det norske kraftnettet. Dette innebærer ansvar for å koordinere driften mellom nettoperatører, og sikre at kraftsystemet i hovedsak unngår ulike avvik. [15]

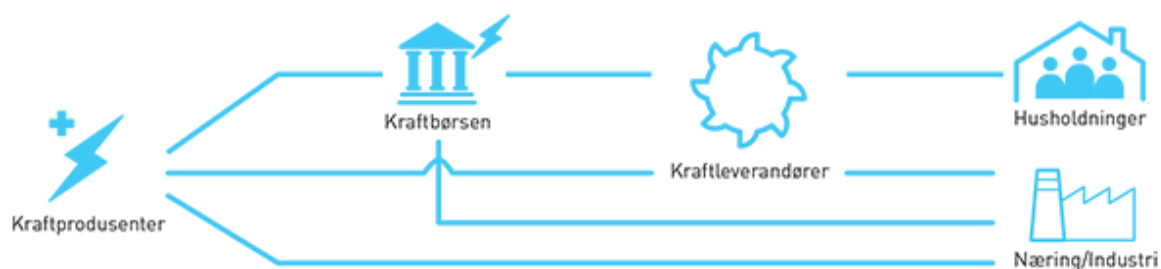
Distribusjonssystemoperatørene (Distribution system operator, DSO) er nettselskaper som har ansvar for regional- eller distribusjonsnettet, og sikrer kraftforsyning ut til forbrukere. [20]

Ansvar for å holde oversyn med hele kraftsystemet er tildelt Reguleringsmyndigheten for energi (RME). Tidligere var dette en avdeling under NVE, men er nå utpekt som en uavhengig reguleringsmyndighet som fører tilsyn med nettselskapenes monopolvirksomhet og sikrer like konkurransevilkår i kraftmarkedet. [21]

### 3.2.3 Kraftmarked

Mens ansvaret for kraftnettet i Norge ligger til monopolvirksomheter, skjer selve omsetninga av kraft i et åpent marked. Norge er del av det nordiske kraftmarkedet NordPool, som videre er tilknytta det europeiske kraftmarkedet ved overføringskabler til blant anna Nederland, Baltikum, Polen og Russland. Disse forbindelsene til Europa er planlagt forsterka, og undersjøiske overføringskabler mellom Norge og Tyskland, samt Norge og Storbritannia er under bygging. [19]

Kraftmarkedet kan deles i to hoveddeler, for engros og for sluttbrukere, som vist i Figur 3.4.



Figur 3.4: Illustrasjon av kraftmarkedet. Henta fra [19].

Sluttbrukermarkedet er den delen som tar for seg salg av kraft til vanlige forbrukere, og i Norge er dette jevnt fordelt mellom husholdninger, industri og mellomstore kunder i annen næring.

Engrosmarkedet er for handel av store mengder kraft, og er videre delt i tre: «day ahead»-markedet, kontinuerlig intradagmarked og balansemarked. De to førstnevnte foregår gjennom organisert børshandel, mens balansemarkedene drives av Statnett og andre TSOer for å sikre momentan balanse i kraftsystemet. Dette omtales nærmere i kapittel 3.4.

### 3.3 LEVERINGSKVALITET I KRAFTSYSTEMET

Tilgang på stabil kraft av god nok kvalitet er avgjørende for både for folks dagligliv og næringsliv, og har stor betydning for samfunnets funksjon.

Om den elektriske krafta ikke holder høy nok kvalitet kan dette føre til unødvendig høy belastning på, og dårligere utnyttelse av, elektrisk utstyr. Eksempler på dette er at glødelamper vil kunne gi dårlig lysutbytte, enheter med elektriske klokker kan forstyrres og begynne å gå feil, motorer kan operere under ikke-optimale forhold, og i verste fall kan slikt stress føre til kortere levetid og havari på utstyr. På sikt er dette dyrt for både forbruker og samfunnet. [22]

Et ledd i å sikre alle nettkunder tilgang på kraft som holder «tilfredsstillende leveringskvalitet» er *Forskrift av 10.12.2004 om leveringskvalitet i kraftsystemet (leveringskvalitetsforskriften, FoL)* som omhandler håndtering av kvalitetsavvik og avbrudd i kraftleveransen. Her er det fastsatt hva som er å regne som normalverdier, og definert hva som regnes som avbrudd og kvalitetsmessige avvik, og nettselskaper pålegges å overvåke egne nett for å oppdage og føre oversikt over avvik som oppstår. [23]

De fleste krava til kraftleveransen som defineres i FoL er knytta til forsyningsspenninga og forstyrrelser i denne. Den vanlige forsyningsspenninga i Norge er som hovedregel 230 V eller 400 V, avhengig av om den er levert i enfase eller trefase, som nevnt i kapittel 2.2.6. Det kan også gjøres avtaler om andre nivåer på forsyningsspenninga, for eksempel til bruk i elektrisitetsdrevet industri. [23]

Videre følger en gjennomgang av ulike avvik for leveringskvaliteten som er definert i FoL.

#### 3.3.1 Avbrudd

Et avbrudd i kraftforsyninga defineres som uteblitt levering av elektrisk energi, der forsyningsspenningene er under 5% av normale verdier. Det skilles mellom langvarige avbrudd (>3 min) og kortvarige avbrudd ( $\leq 3$  min) ut fra avbruddsvarigheten, eller tida det tar fra avbruddet oppstår til leveringsspenninga igjen er over 90% av normal verdi. [23]

Fordi god leveringspålidelighet er viktig er det innført en ordning med kvalitetsjusterte inntektsrammer ved ikke-levert energi (KILE), der nettoperatorene straffes økonomisk ved avbrudd i kraftleveranse. Størrelsen på inntektsbortfallet avhenger av hvor lenge avbruddet varer og hvor mange kunder som er rammet i ulike kundegrupper (jordbruk, husholdning, industri, handel og tjenester, offentlig virksomhet og industri med el-drevne-prosesser). [24]

I Norge er leveringspålideligheten generelt god, med nivåer på opp mot 99.99%. I 2017 opplevde norske strømkunder i gjennomsnitt 1.6 kortvarige og 1.7 langvarige avbrudd. Ulike grunner til at det skjer ikke-planlagte avbrudd kan være tordenvær og lyn, trær som ramler over kraftlinjer, eller snø og is som legger seg på linjene. Å bygge ut et kraftnett som sikrer 100% leveringspålidelighet ville blitt urimelig dyrt. Det er derfor viktig å jobbe forebyggende med blant anna linjerydding, og sikre god beredskap for reparasjon ved hendelser. [25]

### 3.3.2 Langsomme spenningsvariasjoner

«Langsomme variasjoner i spennings effektivverdi» er endringer i spennings effektivverdi over et gitt tidsintervall. I FoL er dette definert som at spennings gjennomsnittlige effektivverdi over ett minutt skal være innenfor  $\pm 10\%$  av nominell spenning, eller «spenningen som et system er betegnet eller identifisert ved», for eksempel 230 V som er vanlig forsyningsspenning i Norge. [23]

### 3.3.3 Kortvarige overspenninger, underspenninger og spenningsstrang

Kortvarige overspenninger eller underspenninger (spenningsdipp) er når spennings effektivverdi raskt øker til under 90% eller over 110% av avtalt spenningsnivå, med en varighet på 10 ms til 60s. Skjer det endringer i spennings raskere enn 0,5 % av avtalt spenningsnivå per sekund kalles dette spenningsstrang.

FoL definerer terskelverdier for når hendelser med spenningsstrang, kortvarig over- eller underspenning telles som avvik: når  $\Delta U_{stasjonær} \geq 3\%$  og  $\Delta U_{maks} \geq 5\%$ .

Her er  $\Delta U_{stasjonær}$  stasjonær spenningsendring som følge av en hendelse, og  $\Delta U_{maks}$  den maksimale spenningsdifferansen i løpet av hendelsen.

For et nett med nominell spenning 0,23-35 kV er det tillatt med inntil 24 avvik per døgn, og for nett med spenning over 35 kV er det tillatt med 12 avvik. [23]

### 3.3.4 Flimrer

Flimrer er synlige variasjoner i lys fra en lyskilde som følge av forstyrrelser i spenning.

Korttidsintensitet av flimrer,  $P_{st}$ , måles over en periode på 10 min. Langtidsintensiteten,  $P_{lt}$  beregnes med bakgrunn i 12 målte  $P_{st}$ -verdier for en periode på 2 timer basert på formel 9:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st}^3}{12}}. \quad (9)$$

For minimum 95% av tida gjennom ei uke skal  $P_{st}$  holdes innenfor 1,2 for nett med spenning 0,23 - 35kV, og 1,0 for nett med spenning over 35 kV. Verdiene for  $P_{lt}$  skal ikke overstige henholdsvis 1,0 og 0,8. [23]

### 3.3.5 Spenningsusymmetri

Spenningsusymmetri i et flerfaset system oppstår når effektivverdiene (den grunnharmoniske komponenten) til linjespenningene som følger hverandre ikke er helt like. Det samme gjelder når fasevinklene mellom linjespenningene er ujevne.

Graden av usymmetri beregnes ved hjelp av formel 10:

$$\frac{U_-}{U_+} = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} * 100\%, \quad (10)$$

der  $U_-$  og  $U_+$  er henholdsvis negativ og positiv komponent for spenninga, og  $\beta$  defineres ved hjelp av formel 11:

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}, \quad (11)$$

der  $U_{ij}$  er grunnharmonisk komponent for linjespenninga mellom fase  $i$  og  $j$ . [23]

### 3.3.6 Overharmoniske spenninger

Overharmoniske spenninger er sinusforma spenninger med frekvensen  $f_h = nf$ , der  $n$  er et hvilket som helst tall, og  $f$  er forsyningsspenningas harmoniske frekvens. Den totale harmoniske forvrengninga (total harmonic distortion, THD) beregnes ved hjelp av formel 12:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} * 100\%, \quad (12)$$

der  $U_1$  er spenningas grunnharmoniske komponent,  $U_h$  er en bestemt harmonisk spenningskomponent og  $h$  er harmonisk orden for komponenten. For individuelle harmoniske forvrenginger,  $\% U_h$  brukes formel 13: [23]

$$\% U_h = \frac{U_h}{U_1} * 100\%. \quad (13)$$

### 3.3.7 Diverse forstyrrelser

Andre forstyrrelser som omtales i FoL [23]:

- Interharmoniske spenninger: sinusforma spenninger med frekvens mellom de overharmoniske spenningene
- Signalspenning som er overlagra forsyningsspenninga med hensikt å overføre informasjon gjennom kraftnettet
- Transiente overspenninger som er høy- eller over-frekvente, med varighet  $> 10$  ms''

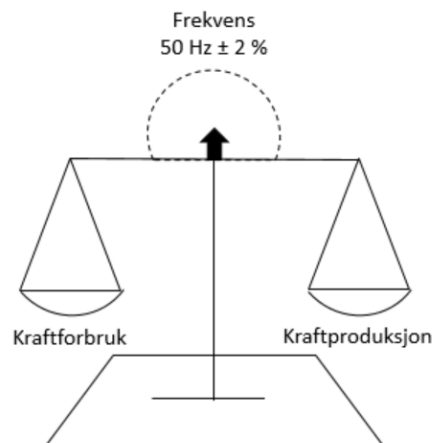
Disse omtales ikke videre i denne oppgava.



### 3.4 BALANSEMARKEDER OG FREKVENSRREGULERING

Som nevnt i kapittel 3.2.3 er balansemarkedet en viktig del av kraftmarkedet. Hensikten med dette er å sikre stødig regulering av frekvensen i overføringsnett. Fra FoL er det definert at denne skal være  $50 \text{ Hz} \pm 2\%$ , det vil si i intervallet 49-51 Hz. [23]

Når balansen mellom forbruk og produksjon i et kraftsystem endrer seg, påvirkes frekvensen i systemet som vist i Figur 3.5. Når en endring i frekvensen inntreffer vil systemet først justeres ved hjelp av treghet («inertia») i roterende masser i kraftsystemet, som motsetter seg frekvensendringen og frigjør eller tar opp bevegelsesenergi i de roterende massene for å kompensere for endringa. På den måten bidrar tregheten til å gjenopprette kraftbalansen og den opprinnelige frekvensen. Generatorer i vannkraftverk, varmekraftverk eller kjernekraftverk utgjør gjerne de roterende massene i et kraftnett. Responsten fra disse skjer automatisk, men har bare noen sekunders varighet og kan heller ikke kompensere for store ubalanser. [26]



Figur 3.5: Illustrasjon av balansemarkedets betydning for frekvensen i kraftnettet. Basert på [27]

Siden frekvensreguleringa ved roterende masser har kortvarig og begrensa virkning, kan det være behov for flere bidrag for å sikre balanse i kraftsystemet.

I Norge har Statnett som TSO ansvar for å sikre nok reserver, i form av primær-, sekundær og tertiærreserver til å skape balanse. Handelen av disse omtales som balansemarkedet. [28]

Primærreservene («frequency containment reserve», FCR) aktiveres automatisk, bidrar til balansering i løpet av få sekunder, og baseres på generatorer med størrelse over 10 MVA. [29]

Videre balanse avhenger av raske frekvensreserver («fast frequency reserves», FRR), som deles inn i to – de aktive sekundærreservene (aFRR) og manuelle tertiærreserver (mFRR). aFRR baserer seg på gjerne produksjonsanlegg som får tilsendt automatiske signaler som reduserer produksjonen, og på den måten bidrar til balanse. Systemet kan også brukes på enkelte anlegg med stort forbruk, der forbruket kan styres raskt opp og ned med automatiske prosesser. mFRR kalles også regulerkraft, og er justeringer i kraftforbruk eller –produksjon som manuelt kobles inn og ut etter behov. Disse har en responstid på inntil 15 s. [30] [31]

### 3.5 OVERFØRINGSKAPASITET I KRAFTNETTET

Tradisjonelt har den norske kraftproduksjonen vært basert på store vannkraftanlegg spredt rundt om i landet. Krafta har derfor vært transportert fra produksjonssted til forbruk ute hos enkeltkunder først ved hjelp av sentralnettet, deretter regional- og distribusjonsnettet. På denne måten har effektflyten i nettet i stor grad fungert med effektflyt i kun en retning.

Med framveksten av PV-anlegg har det blitt flere anlegg for distribuert generering av kraft, som kobles direkte inn i distribusjonsnettet. Dette bidrar ikke bare til at kraftproduksjon potensielt flyttes nærmere forbruk, men også at effektflyten blir «toveis», med innmating av kraft ute i distribusjonsnettet, noe det sjelden er dimensjonert for. Det er også venta at elektrifisering av industri og transportsektoren skal gi et økt kraftforbruk, noe som omtales i kapittel 4.2.

Sammen med framveksten av vindkraft vil dette kunne føre til utfordringer ikke bare med tanke på spenningsregulering, men også kapasitet i flaskehalsar med lav overføringskapasitet. I tillegg vil mer ustabilitet gjøre kraftproduksjonen mer uforutsigbar, og noe som vil forsterke disse utfordringene.

En måte å adressere kapasitetsutfordringene på vil være å bygge seg ut av utfordringene ved å øke den totale kapasiteten i det tradisjonelle kraftnettet. Å satse på dette som eneste løsning vil kunne gi god leveringssikkerhet i framtida, men er svært dyrt og ikke samfunnsøkonomisk lønnsomt. [32]

Som vist i kapittel 2.2.5 opptar også reaktiv effekt kapasitet i kraftnettet, og det er gjort beregninger som tyder på at det finnes store muligheter for å effektivisering gjennom bedre håndtering av reaktiv flyt i distribusjonsnett. Flere nettselskaper uttrykker at de ønsker flere muligheter for å stille krav til reaktiv effekt som tilføres distribusjonsnettet. [32]

Det er derfor venta at løsninger for å kompensere reaktiv effekt vil få en større verdi i framtidens kraftsystem, og systemer for å sikre en god harmonisering av effektfaktor vil være viktig i kraftproduksjonen.

## 4 SOLKRAFT SOM ELEKTRISITETSKILDE

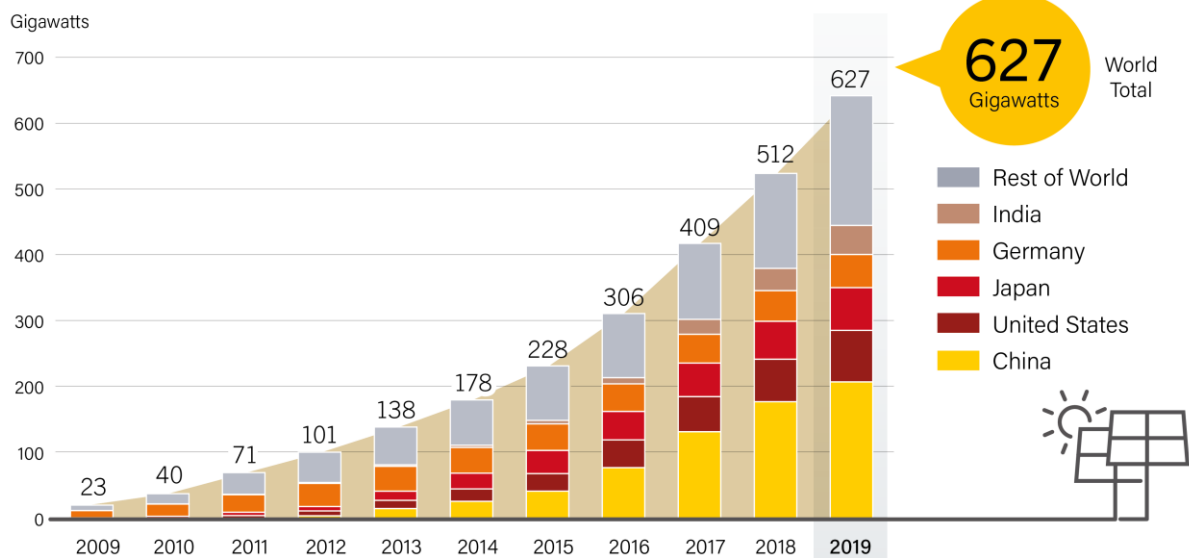
### 4.1 UTBREDELSE AV SOLKRAFT I VERDEN OG I NORGE

Som nevnt i innledninga øker total installert PV-kapasitet i både Norge og verden raskt som følge av at prisen på PV-moduler har sunket. For solceller omtales den installerte effekten som maks produksjonskapasitet eller «peak», målt i watt og betegnes med  $W_p$ . [33]

Bare i 2019 ble det bygd ut hele 115  $GW_p$ , som tilsvarer en økning på 22,5% sammenlikna med året før. Figur 4.1 viser utviklinga i perioden 2009-2019 i de fem største PV-nasjonene Kina, USA, Japan, Tyskland og India, samt verden for øvrig.

Dette bidrar til at andelen kraft fra PV-anlegg på verdensbasis øker, og i 2019 utgjorde solkraft rundt 3% av den totale kraftproduksjonen. Denne utviklinga skyldes at det siden 2010 har vært en stor økning i årlig utbygd kapasitet i PV-anlegg, i takt med at prisen på PV-moduler har sunket raskt. Blant de fem nevnte landa er det foreløpig Tyskland som har størst andel av kraft fra PV, der dette utgjør 8,2% av den totale produksjonen.

Solar PV Global Capacity, by Country and Region, 2009-2019



Note: Data are provided in direct current (DC).

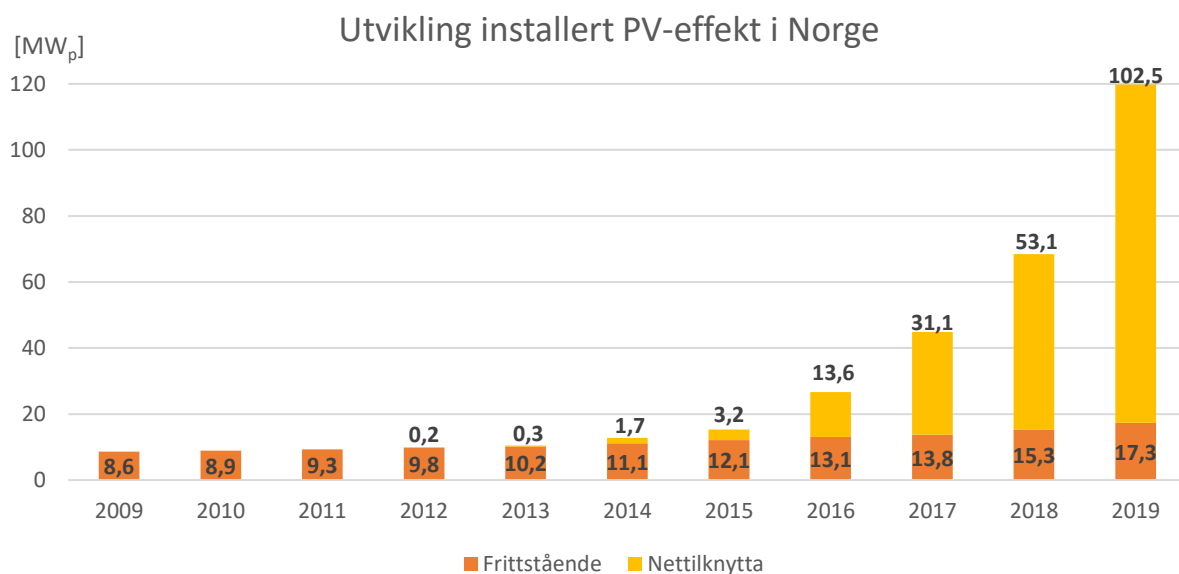
REN21 RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT

Figur 4.1: Utviklingen i installert PV-effekt globalt i perioden 2008-2018 for de fem største PV-nasjonene og resten av verden. Henta fra [33].

I tillegg til landa framheva i figuren bidro land som Vietnam, Spania, Australia, Ukraina og Sør-Korea med stor vekst i PV-effekt installert i 2019. Blant andre land med høy PV-andel finner vi land som Honduras (10.7%), Italia (8.6%), Hellas (8.3%), og Chile (8.1%). [33]

Selv om Norge ikke kommer med på verdenstoppen verken i installert effekt eller andel kraft fra PV, likner også utviklinga her den globale veksten, som vist i Figur 4.2. Tradisjonelt sett har PV-anlegg i Norge vært frittstående anlegg, gjerne på hytter langt utenfor allfarvei, med en ganske beskjeden utvikling i installert effekt i seinere tid.

Fra 2015 har det kommet til en vekst i PV-effekt tilknyttet kraftnettet, og i perioden 2015-2019 vokste den nettilknyttede installerte effekten fra 3,2 MW<sub>p</sub> til 102,5 MW<sub>p</sub>. Dette bidro til at installert PV-effekt i Norge vokste med 680% i denne perioden, og 75% fra 2018 til 2019. [6] [17]



Figur 4.2: Utvikling i total installert PV-kapasitet i Norge, 2005-2019. Basert på [6].

En ordning for å legge til rette for solkraft i liten skala i Norge er plusskundeordninga. Den gjør at vanlige strømkunder med PV-anlegg som aldri leverer mer 100kW til distribusjonsnettet er fritatt avgifter for innmating av effekt. [34]

Dette har bidratt til en betydelig vekst i mindre anlegg både i private husholdninger. Det er likevel større anlegg på tak som utgjør mesteparten av installert PV-kapasitet i Norge. [6] [17]

I 2019 var utbygginga av PV-kapasitet i Norge fordelt som vist i Tabell 4.1.

Tabell 4.1: Fordeling av utbygd PV-kapasitet i 2019 etter type PV-anlegg og størrelse. Basert på [35].

Bygningstype, PV-anlegg	Størrelse	Andel av total utbygging
Private husholdninger	< 15 kW <sub>p</sub>	36 %
Næringsbygg	15 – 250 kW <sub>p</sub>	23 %
Industri	> 250 kW <sub>p</sub>	35%
Bygningsintegert, frittstående (off grid)	-	6%

Dette viser at det er vesentlig vekst i både små og store PV-anlegg i Norge.

## 4.2 PV I KRAFTMARKEDET – NORGE OG EUROPA MOT 2040

Som tidligere nevnt har Norge siden 2006 vært del av det nordiske kraftmarkedet NordPool, og blir stadig mer integrert med det europeiske markedet, som vist i kapittel 3. Som en konsekvens av dette vil utviklinga av det norske kraftnettet bli sterkt påverka av utviklinga i energisektoren i Europa. [19]

Det er venta at det i åra framover vil bli en stor omlegging fra dagens bruk av fossile råvarer til både energi- og kraftproduksjon, til produksjoner som baserer seg på mindre utslipp av klimagasser. Med omfattende elektrifisering innen transport, tradisjonell industri og petroleumsnæringa i tillegg til framveksten av datasentre, er det venta at kraftforbruket i Norge kan komme til å øke til 163 TWh i 2040. [36]

I samme periode er det venta en utbygning i kraftproduksjonskapasitet som tilsvarer den venta økninga i forbruk, slik at total kraftproduksjon i 2040 kan være på 182 TWh. Denne økninga i installert effekt er venta fordelt på ulike produksjonsformer som vist i Tabell 4.2.

Tabell 4.2: Antatt økning i installert effekt innen ulike kraftproduksjoner framover mot 2040. Basert på [36].

Vannkraft	Solkraft	Vindkraft	Havvind	Termisk kraft	Totalt
10 TWh	7 TWh	7 TWh	4 TWh	-1 TWh	26 TWh <sup>1</sup>

Selv om solkraft alene ikke er venta å utgjøre en stor andel av kraftmarkedet i Norge i 2040, er det beregna at ikke-regulerbar kraft fra sol og vind kan komme til å utgjøre opp mot 40% av kraftproduksjonen i Norge og 50% i Europa. Dette tilsvarer en økning på 200% fra dagens utbygde kapasitet.

Med denne økninga i ikke-regulerbar kraft vil verdien av fleksibilitet øker, og at kraftpriser som varierer gjennom døgnet vil kunne legge til rette for fleksibelt forbruk på tider av døgnet der etterspørselen er lav. Dette vil også kunne gjøre det mer attraktivt med energilagring ved hjelp av batterier eller hydrogenproduksjon.

Alt i alt vil dette kunne legge til rette for utfasing av Europas kullkraft, og betydelig reduksjon i gasskraftproduksjonen, selv om det fortsatt kan komme til å være et behov for noe gasskraftproduksjon som et ledd i å balansere kraftmarkedet, både med tanke på effektbalanse og bidrag til frekvensregulering ved hjelp av roterende masser. [36]

Hittil er det belyst en rekke utfordringer det norske kraftnettet står ovenfor. Disse kan oppsummeres i tre hovedpunkter:

1. Ulike spenningsutfordringer
2. Balanse og frekvensregulering
3. Kapasitet i kraftoverføring

---

<sup>1</sup> Summen avviker fra talla i tabellen på grunn av avrunding av talla.

Utbygging av distribuert kraftproduksjon, herunder også PV, er med på å utfordre disse tre.

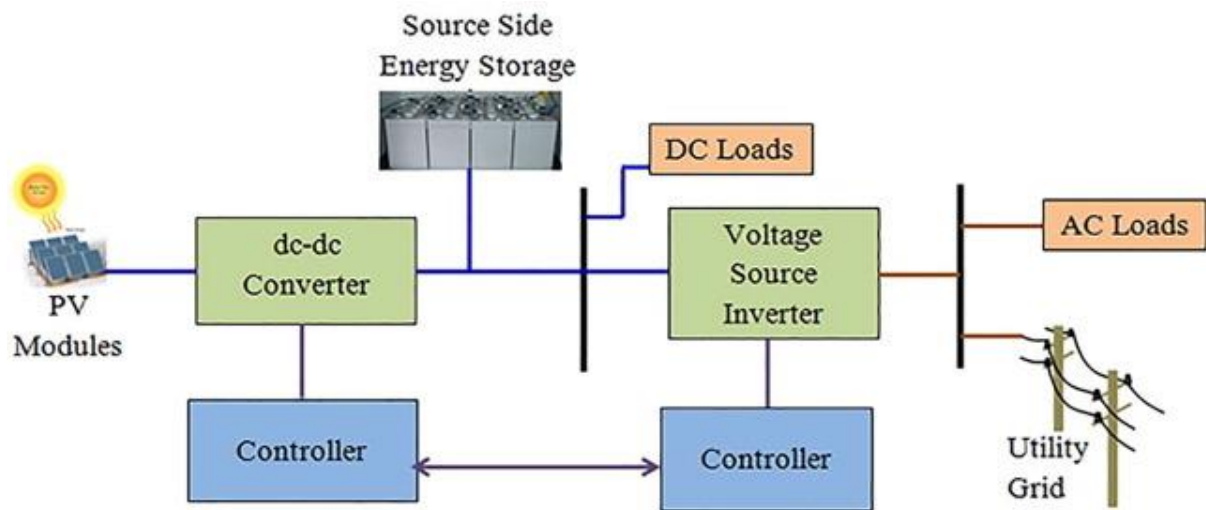
I takt med økt elektrifisering basert på mer ikke-regulerbar kraft, melder det seg også et behov for økt digitalisering i kraftsektoren.

Med nye, automatiske strømmålere (avansert måle- og styringsystem, AMS) slipper man ikke bare å lese av energiforbruket for en periode manuelt. De gir også mulighet for å lese av effektforbruket til enhver tid, og med smartere enheter kobla til strømmettet og billigere batterier, legges det til rette for smartere kraftforbruk. Energikrevende prosesser, som oppvaskmaskiner eller elbillading kan da gjøres når det er overskudd av kraft i systemet, og prisen på krafta er lav. Dette systemet er basert på effektprising, og er ikke utbredt i sluttbrukermarkedet i Norge enda.

Det er også venta at ny sensorteknologi vil føre til at tilgangen på data som beskriver kraftsystemet vil øke. Derfor er det grunn til å tro at også stordatahåndtering og kunstig intelligens («Artificial intelligence», AI) vil få stor betydning for framtidens energisystem. [37]

### 4.3 UTFORMING AV PV-ANLEGG

Et typisk PV-anlegg består av ulike elektriske komponenter som står for produksjon og bearbeiding av elektrisk kraft, og kan enten være tilknyttet kraftnett eller frittstående, da i kombinasjon med batteri eller annen form for energilagring. Et eksempel på utforminga av et nettilknyttet PV-anlegg er skissert i Figur 4.3.



Figur 4.3: Skisse over hvordan et enkelt PV-anlegg kan se ut. Henta fra [38].

Selve kraftgenereringa skjer ved at fotonvoltaiske celler bestråles av sollys slik at elektroniske ladninger frigjøres, og sendes som DC ut i en krets.

Et solcellepanel, eller PV-modul, består av flere solceller, og et vanlig PV-anlegg består gjerne av flere moduler koblet sammen i en kombinasjon av serie- og parallellkoblinger. Seriekoblingene bidrar til at spenningen over PV-strengen øker, mens parallellkoblingene bidrar til at den totale strømmen øker, og dermed også den totale effekten i anlegget. [39]

Krafta som genereres i PV-modulene er basert på DC, og fordi spenninga ut av modulen ofte varierer som følge av kriterier satt av kontrollsystemet, må denne gjerne gjøres om til en konstant spenning ved hjelp av en DC-DC-omformer («converter»).

Når DC-spenningen har blitt gjort om til riktig nivå, kan krafta brukes til å lade opp et batteri, brukes i laster som krever DC-strøm, eller omformes videre i en DC-AC-inverter, som i figuren er merka som «Voltage source inverter». Ved hjelp av kontrollsystemet over inverteren, sikres det at krafta har egenskaper som samsvarer med krafta på distribusjonsnettet («Utility grid»), slik at den kan sendes ut til distribusjon, eller brukes i AC-laster. [40]

Videre følger en utdypning av noen av komponentene som er spesielt viktig for å sikre harmonisering av effekten fra PV-anlegget mot effekten på distribusjonsnettet.

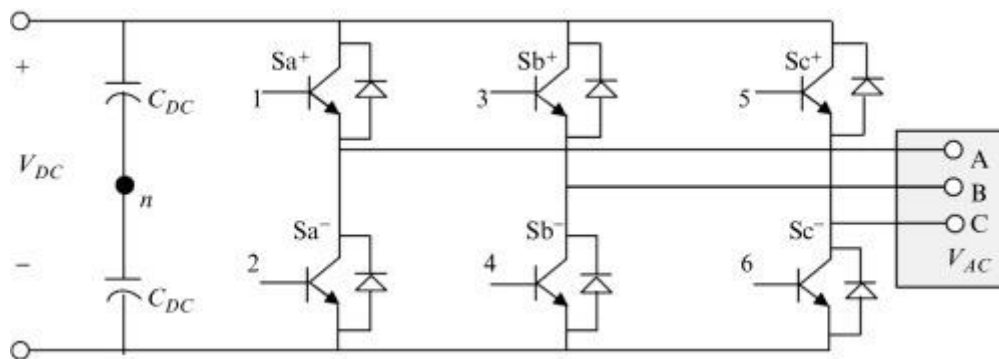
### 4.3.1 Inverterer

Enheter for å omforme effekten i et PV-anlegg er å regne som den viktigste komponenten for å sikre at effekten som genereres kan brukes til noe fornuftig.

Inverterere finnes i mange ulike varianter og klassifiseres ut fra hvordan de er konstruert, plassering i anlegget og ikke minst hva slags signaler de bruker og omdanner. I et PV-system kan begrepet inverter brukes om selve enheten for DC-AC-omforming, eller om alle komponentene som sikrer omforming og harmonisering av effekt, med både DC-DC-omformer, DC-AC-omformer, filter-funksjoner og kontrollmekanismer.

Videre er begrepet inverter brukt om enheten for DC-AC-omforming, om ikke anna er spesifisert.

En måte å klassifisere en inverter på, er basert på signalet den opererer på, for eksempel en «Voltage source inverter» (VSI) som drives på spenning. Skisse av en enkel trefase VSI bestående av seks brytere er vist i Figur 4.4.



Figur 4.4: Viser en ekvivalentkrets for en trefase VSI. Henta fra: [41].

Tilsvarende opererer en «current source inverter» på strøm, og denne har en spole kobla over DC-busen før DC-AC omformereren, der en VSI har en (eller flere) kondensator, noe Figur 4.4 illustrerer. [41]

I tillegg finnes det «Z source»-invertere, som også håndterer den samme funksjonen som en DC-DC-forsterker utfører, uten behov for en DC-DC-bro. [42]

En annen forskjell mellom et par vanlige inverter-typer, er for «half bridge inverter» og «full bridge inverter», begge varianter av VSI. Topografien i en «full bridge inverter» er basert på et sett brytere, som vist i Figur 4.4. I en «half bridge inverter» er de to bryterne til venstre i ekvivalentsskissa bytta ut med kondensatorer, og lederen mellom dem er kobla til jord. Dette er en enklere inverter enn «full bridge», men krever en mye høyere DC-spenning for å få kunne levere samme spenning ut. [40]

En måte å filtrere signalet ut av en inverter er ved bruk av pulsbreddemodulasjon («pulse width modulation», PWM) ved hjelp av brytere. Slike invertere kalles PWM invertere. [40]

Et annet begrep som brukes er smart-inverter. For at en inverter skal passe denne beskrivelsen må den være digitalt basert, fleksibel og kunne håndtere signaler og endringer raskt. [43]



### 4.3.2 Filter

Effektfilteret er gjerne en del av inverteren, på nett-siden av DC-AC-omforming, og bidrar til å sikre harmonisering mot distribusjonsnettet. Filteret består av en krets som omdanner, omformer eller aviser elektriske signal basert på om frekvensen til signalet oppfyller forhåndsdefinerte kriterier.

Det skilles mellom to hovedtyper effektfilter: aktive og passive.

#### 4.3.2.1 Passivt effektfilter

Et passivt effektfilter består av kombinasjoner av motstander ( $R$ ), spoler ( $L$ ) og kondensatorer ( $C$ ).

Alle virkelige ledere har motstand,  $R$ , eller evne til å motsette seg å skulle lede strøm, som fører til en spenningsdifferanse (tap) over lederen. I en resistor, eller motstand, er dette en ønskelig egenskap, i motsetning til i en strømløsing. [44]

Fordi AC er basert på svingninger mellom et negativt og positivt maksimum, vil alltid strømmen være i endring. Når AC-strøm sendes gjennom en spole med induktans  $L$ , vil det indukeres en strøm som motsetter seg endringen i AC-strømmen til enhver tid. Dette fører til et faseskift, som gjør at strømmen blir liggende  $90^\circ$  bak spenningen. [11]

En kondensator med kapasitans  $C$ , består av to ledere med isolerende materiale i mellom. Når kondensatoren settes under AC vil positive og negative ladninger hoppe seg opp vekselvis på hver sin leder, og det oppstår en «puls» i det elektriske feltet mellom dem. Dette fører til et faseskift, som gjør at strømmen blir liggende  $90^\circ$  foran spenningen. [11]

Ved å benytte en krets sammensatt av  $RLC$ -komponenter, kan effekten som filtreres få endre faseforskyvning, og på den måten redusere harmoniske forstyrrelser. Faseforskyvningen filteret kan bidra med bestemmes ut fra hvilke  $RLC$ -komponenter signalet sendes gjennom.

#### 4.3.2.2 Aktivt effektfilter

I et aktivt effektfilter vil filteret tilpasse nødvendig faseforskyvning ved å oppdage harmoniske forstyrrelser i signalet, og kompensere ved å tilføre en motsatt faseforskyvning. Dette gjør at et aktivt effektfilter er egnet til å fjerne flere grader av harmoniske forstyrrelser. [45]

### 4.3.3 Lagring av elektrisk energi

Det finnes flere måter å lagre energi fra et PV-system for å sikre en jevnere effektflyt ut i distribusjonsnettet. Dette gir ikke bare bedre balanse i kraftmarkedet, men bidrar også til å sikre god kvalitet på effekten i kraftnettet.

#### 4.3.3.1 Batterier

Batterier, eller akkumulatorer, er enheter som lagrer kjemisk energi i celler med bestemt cellespenning. Hver celle er utstyrt med en positiv og en negativ elektrode, og ved å koble disse inn i en krets kan batteriet levere energi som omdannes fra det kjemiske lagringsmediet.

Det skilles mellom primærbatterier som er beregna for engangsbruk, og sekundærbatterier som kan lades og utlades flere ganger. [46]

Det er viktig at opplading og utlading av batterier skjer under kontrollerte former, for å utøve minst mulig stress på batteriene. Derfor omtales batteriers «state of charge» (SoC), som tar for seg hvor raskt opp- og utladingen skjer, og hvor stor andel av batteriets kapasitet som er i bruk. Dette tilsier at batteriet er helt tømt for energi ved 0%, og lada opp til maks kapasitet ved 100%. Rask opplading og utlading, eller å jevnlig bringes til ytterpunktene for SoC, vil utgjøre en belastning på batteriet som kan føre til redusert ytelse og kortere levetid. [46]

Batteria som sitter i elbiler er sekundærbatterier, som til deler av døgnet kobles til kraftnettet. Effektiv styring av opplading og utlading ved å utveksle energi mellom elbilbatteriet og kraftnettet kan bidra til at kapasitetsutfordringer i områder med stor tetthet av elbiler reduseres.

#### 4.3.3.2 Superkondensator

Utforminga av kondensatorer er kort omtalt i kapittel 4.3.2.1. Disse tåler raskt opp- og utlading, i motsetning til et batteri.

En superkondensator har stor kapasitans, og siden energien lagres uten å omformes til andre energiformer, har den også høy virkningsgrad. På grunn av lav energitetthet som gir høy kostnad er superkondensatorer lite egna til å lagre energi over tid, men er egna som en buffer i kortere perioder. [47]

#### 4.3.3.3 Hydrogen, elektrolyse og brenselcelle

Hydrogen er en form for kjemisk energilagring med høyere energitetthet enn fossile drivstoffer. I tillegg kan hydrogen forbrennes med utslipp som består av kun vann.

Hydrogen til bruk som drivstoff kan for eksempel produseres gjennom elektrolyse (EL) i vann, der strøm bidrar til å spalte hydrogen fra oksygenet i vann.

Selve reaksjonen i en brenselcelle («Fuel cell», FC) likner på reaksjonen som frigir energi fra et batteri. Den største forskjellen ligger i at FC må ha tilført kilden, eller drivstoffet, mens batteriet har det lagra internt. Batteriets kilde vil tappes til det ikke lenger kan levere strøm, mens FC kan fortsette å levere strøm så lenge den får tilført drivstoff. [48]

#### 4.3.4 Andre funksjoner i et PV-anlegg

##### 4.3.4.1 *Fleksible AC transmisjonssystemer (FACTS)*

FACTS er kontroll-enheter som er installert i et AC-nettverk for å kunne øke overføringen av effekt og bidra til økt stabilitet i nettet, gjennom å kompensere reaktiv effekt. De grunnleggende strategiene for FACTS bygger på bruken av komponenter som kondensatorer og spoler koblet til shunt- eller serie-kompensatorer. Enheter som opereres som FACTS kan være del av filtreringsprosesser eller en inverter. [49].

Eksempler på bruk av FACTS er [50] [51]:

- «Static synchronous compensator» (STATCOM)
- “Static volt-ampere reactive (VAR) compensators” (SVC)
  - Herunder «Dynamic Voltage Restorer» (DVR)
- “Unified power quality conditioner” (UPQC)

Bruk av FACTS er den tradisjonelle måten å håndtere reaktiv effekt på i PV-systemer, men begynner å bli utfordra av andre løsninger, som et eksempel som belyses i kapittel 7.1.1.

##### 4.3.4.2 *Kontroll-systemer*

Alle PV-systemet er avhengige av kontroll-strategier, og det finnes et utall ulike kontrollstrategier og kontroll-algoritmer for å påse at PV-systemer skal kunne fungere godt. De kan virke inn på ulike deler av systemet, og kan for eksempel bidra til å sikre god effektivitet fra solcellene, eller for å justere AC-signalet før levering ut på distribusjonsnettet.

Blant de aller mest utbredte finner vi «maximum power point tracker» (MPPT) som er en kontrollmekanisme som sikrer at PV-modulene til enhver tid leverer størst mulig effekt ut fra gitte forhold.

Fordi variasjonen i ulike kontroll-strategier så store og mange av disse kontroll-algortimene er så omfattende, er ikke disse omtalt nærmere i denne oppgava. Det har heller vært ønskelig å se på de fysiske komponentene som bidrar i harmonisering av effektkvaliteten, framfor kontroll-enheten som styrer dem.

## 5 LITTERATURSTUDIE: METODE

---

Litteraturstudien består av to hoveddeler: et litteratursøk som gir en generell oversikt over løsninger omtalt i forskningsartikler, og deretter en fordypningsdel som går nærmere inn på et utvalg av disse løsningene.

### 5.1 LITTERATURSØK

Litteratursøket ble gjennomført ved søk i to databaser høsten 2020, og består av treff fra Science Direct (SD) som er supplert med et utvalg artikler fra Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Det ble også vurdert å bruke søk i Google Scholar, men erfaring fra innledende søk viste at antall treff ble uhåndterlig samtidig som det var stort overlapp med treff fra databasene som ble tatt i bruk.

Formålet med litteratursøket var å få en oppdatert oversikt på hvilke løsninger som er mest utberedt for å harmonisere effekten levert fra PV-anlegg til det elektriske distribusjonsnettet. Det var ønskelig å se på alle typer PV-anlegg artiklene tar for seg, og det ble derfor ikke gjort forskjell på om artiklene tar for seg mindre, gjerne bygningsintegreerte anlegg, eller om det er solkraftverk som er omtalt.

Disse kriteriene la grunnlaget for en søkestreng som skulle sikre et så relevant søk som mulig. Denne er gjengitt i Tabell 5.1. Det ble også brukt som kriterium at artikkelen skulle være publisert i perioden 2015-2020, for å sikre at oversikta gir et oppdatert bilde på løsninger som utvikles. Dette henger sammen med veksten i installert PV-effekt som vist i Figur 4.1 og Figur 4.2, og en antakelse om at dette også har bidratt til at litteratur fra denne perioden gir et godt bilde på den teknologiske utviklinga.

Tabell 5.1 Oversikt over søkekriterier brukt i litteratursøket

<b>Tittel:</b>	PV OR photovoltaic
<b>AND</b>	grid
<b>AND</b>	voltage OR power OR frequency
<b>AND</b>	control OR regulation OR quality
<b>Årstall:</b>	2015 - 2020

Totalt sett ga dette søket 63 treff fra SD og 467 fra IEEE. For å få dette ned i et håndterbart utvalg artikler, ble det derfor kun brukt Open Access-artikler fra IEEE som et supplement til utvalget fra SD. Det ga et totalt antall artikler fra det automatiske søket på 95.

Artiklene ble deretter gjennomgått manuelt for å sikre relevans, og sammenstille en oversikt over litteratursøket. Tre kriterier ble lagt til grunn for den manuelle sorteringa:

1. Må ta for seg minst en løsning for å harmonisere effekten fra PV-anlegg til det elektriske distribusjonsnett
2. Må ta for seg PV-anlegg, eller hybridanlegg med PV, som var koblet til et elektrisk distribusjonsnett med AC
3. Må ha fokus på vanlig leveranse til det elektriske distribusjonsnett

Det ble derfor sortert ut artikler som blant anna:

- Retta seg mot regionalnettet (ingen artikler i søket omfatta sentralnett), frittstående anlegg eller anlegg tilknytta DC-nett
- Kun slo fast at det finnes utfordringer, uten å framheve løsninger på dette
- Kun hadde fokus på økt effektivitet i PV-systemet, gjennom MPPT eller liknende
- Fokuserte på feilhendelser, eller «fault ride through»

Dette førte til at 39 artikler ble sortert vekk, og totalt 56 artikler, herunder 45 fra Science Direct og 11 fra IEEE, ble brukt videre i litteraturstudien. En oversikt over disse artiklene finnes i vedlegg 0: Vedlegg A: Artikler.

Kapittel 6.1 viser oversikt over når artiklene i litteratursøket er publisert, fordelt på hvilken database de stammer fra. Videre følger oversikt på hva slags type institusjon forfatterne tilhører og i hvilket land denne befinner seg, fordelt på hovedforfattere og medforfattere.

I tillegg er det der vist hva slags type PV-anlegg artiklene omtaler, og hva slags elektrisk distribusjonsnett anlegga er tilknyttet.

### 5.1.1 Kategorisering av utfordringer og løsninger

Artiklene i litteratursøket ble videre undersøkt for hvilke typer effektproblemer de adresserer, samt hva slags løsninger de baserer seg på.

I kapittel 3 vises det til en rekke utfordringer knyttet til kvalitet og leveringsstabilitet i kraftnettet med økt innslag av ikke-regulerbare kraftkilder. Utfordringene er delt inn i kategorier som vist i Tabell 5.2.

I kapittel 4.3 tar for seg noen av de viktigste komponentene i et PV-anlegg som kan inngå i å sikre harmonisering av effekten fra PV-anlegget mot effekten på distribusjonsnett. Disse er delt inn i hovedkategoriene inverter, filter og energilagring i tråd med oversikten i Tabell 5.3.

Det var i litteratursøket ønskelig å se på de fysiske enhetene som bidro i harmoniseringa av effekt. Likevel er det noen overordna kontroll-systemer som i mindre grad er kobla mot fysiske enheter i PV-anlegget, men baserer ser på overordna kontroll-strategier. Disse inngår i en egen kategori «Diverse».

Tabell 5.2: Kategorisering av utfordringer adressert i litteratursøket

Utfordring i leveringskvalitet	Hovedkategori
Avvik i frekvens ( $f < 49$ Hz og $f > 51$ Hz)	Frekvensvariasjoner
Balansering av marked, frekvensregulering	Frekvensvariasjoner
Spenningsvariasjoner, langsomme	Spenningsforstyrrelser
Kortvarige overspenninger	Spenningsforstyrrelser
Kortvarige underspenninger (dipp)	Spenningsforstyrrelser
Spenningssprang	Spenningsforstyrrelser
Flimmer	Spenningsforstyrrelser
Spenningsusymmetri	Spenningskurve
Overharmoniske spenninger	Harmoniske forstyrrelser
Interharmoniske spenninger	Harmoniske forstyrrelser
Kompensering av reaktiv effekt	Reaktiv effekt
Synkronisere effektfaktor	Reaktiv effekt
Avbrudd, kortvarige	Effektkvalitet generelt
Avbrudd, langvarige	Effektkvalitet generelt
Andre forstyrrelser og utfordringer	Effektkvalitet generelt

Tabell 5.3: Kategorisering av løsningene i litteratursøket.

Løsning framheva i artikkel	Hovedkategori
VSI	Inverter
«Full bridge» inverter	Inverter
«Half bridge» inverter	Inverter
Smart inverter	Inverter
Anna inverter	Inverter
Passivt effektfilter	Filter
Aktivt effektfilter	Filter
Batteri	Energilagring
Elbiler	Energilagring
Hydrogen	Energilagring
Batter + superkondensator	Energilagring
Anna kombinasjon	Energilagring
Diverse	Diverse

Fordelingen av utfordringene og løsningene etter denne kategoriseringen er omtalt i kapittel 6.2 og 6.3.

## 5.2 FORDYPNING I LITTERATUR

Etter den generelle kategoriseringa av artikler i litteratursøket, ble det valg ut artikler fra hver av hovedkategoriene for løsningene til videre fordypning. For kategoriene inverter, energilagring og diverse ble det valgt ut to artikler.

Det var ønskelig å se på to artikler som tok for seg ulike underkategorier og typer PV-anlegg innenfor hver løsningskategori. På denne måte ble det mulig å få et inntrykk av hvordan ulike løsninger fungerer til PV-anlegg i ulike størrelser.

I tillegg ble følgende vektlagt:

1. Artikkelen måtte være en forskningsartikkel som lanserer en løsning, og som verifiserer denne ved bruk av simuleringer eller andre forsøk.
2. Artikkelen skulle ikke være en sammenstilling eller «review»-artikkel som tok for seg ulike løsninger.
3. Nyere artikler i utvalget fikk forrang, selv om ingen av artiklene i litteratursøket var spesielt gamle (tidligst fra 2015).

Til slutt ble det lagt avgjørende vekt på om artikkelen presenterte studien på en god og oversiktlig måte.

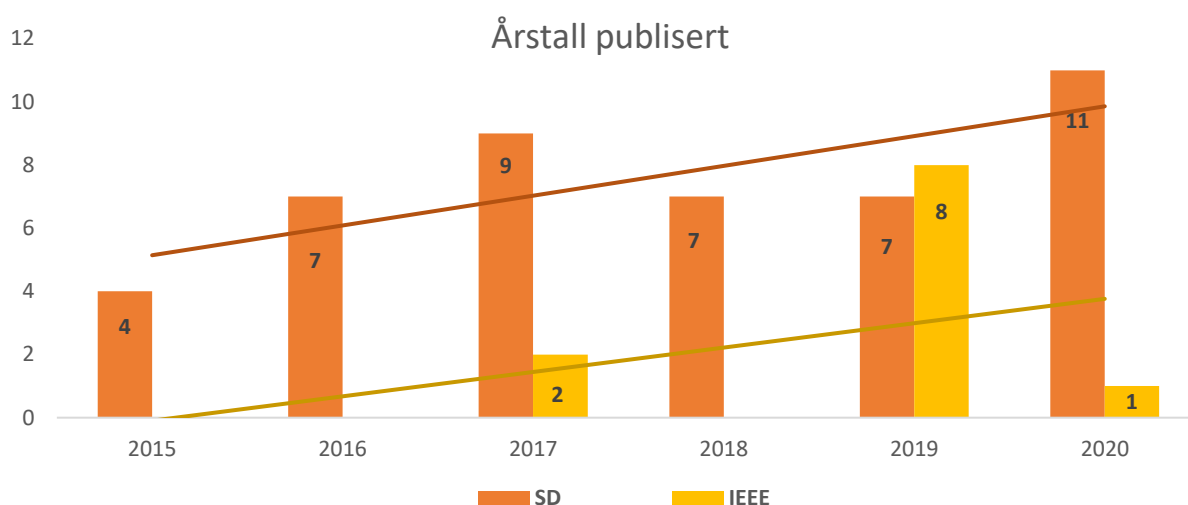
I kategorien for filtre var det vanskeligere å skille filtreringsløsningene i underkategorier. Det ble derfor bare valgt ut en artikkel her.

## 6 LITTERATURSØK: HARMONISERING AV EFFEKT FRA PV-ANLEGG

### 6.1 GENERELT OM ARTIKLENE I LITTERATURSØKET

Det automatiske litteratursøket ga treff på 95 artikler, og etter manuell sortering var det igjen 56 artikler i utvalget. En oversikt over alle artiklene finnes i vedlegg A.

Fordelinga for når i perioden 2015-2020 disse 56 artiklene er publisert vises i Figur 6.1. Disse er også sortert på hvilken database de stammer fra. Figuren viser en trend med økt antall publikasjoner per år utover i perioden for begge databasene. Det bør bemerkes at ikke hele 2020 er inkludert, siden søket er gjennomført høsten 2020.



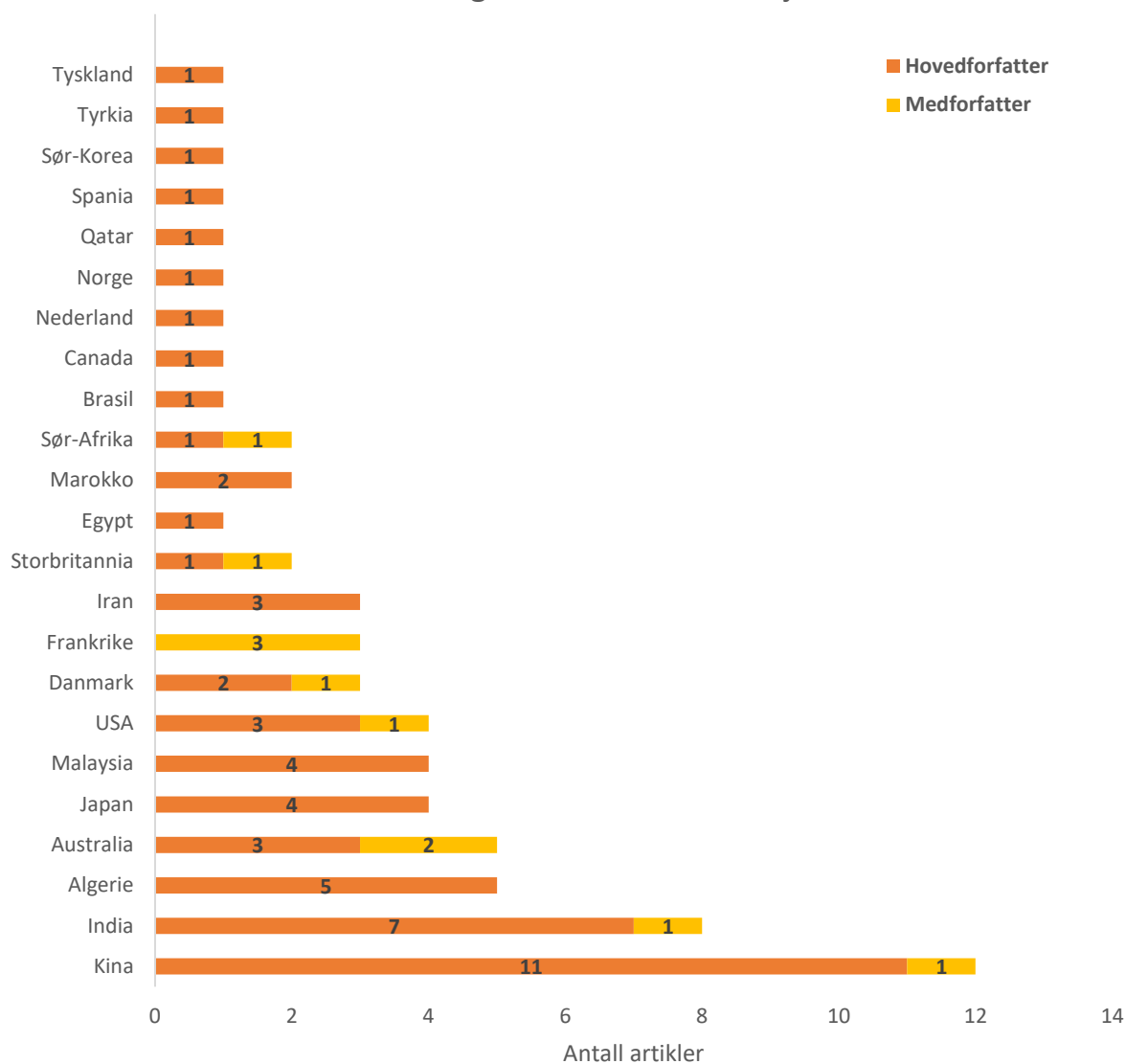
Figur 6.1 Årstall for publisering av artikler, fordelt på databaser.

Videre vises det i Figur 6.2 oversikt over hvilket land forfatterne tilhører, basert på hvor forfatternes institusjoner er lokalisert. Om artiklene har forfattere med tilhørighet til institusjoner i ulike land har alle land med institusjoner som har bidratt blitt telt en gang, men et land er ikke telt mer enn én gang per artikkel. Land-tilhørigheten er også fordelt på om forfatteren er oppført som hovedforfatter, eller medforfatter. I tilfeller der hovedforfatter og medforfatter har tilhørighet til samme land er landet telt med i kategorien hovedforfatter.

Videre er det i Figur 6.3 vist en oversikt over hva slags type institusjon forfatterne er tilknyttet, fordelt på hovedforfatter og medforfatter. Her har også alle typer institusjon som har bidratt i en artikkel blitt telt en gang. På samme måte som for land-tilhørighet, ble det telt hva slags type institusjon artikkelforfatteren er tilknyttet. Er en artikkel skrevet av forfattere tilknyttet et universitet og et forskningsinstitutt, er begge typene institusjoner telt én gang hver. Om begge forfatterne er tilknyttet forskjellige institusjoner i samme kategori, er institusjonstypen telt bare én gang. I tilfeller der hovedforfatter og medforfatter har tilhørighet til samme type institusjon, er institusjonen telt med i kategorien hovedforfatter.

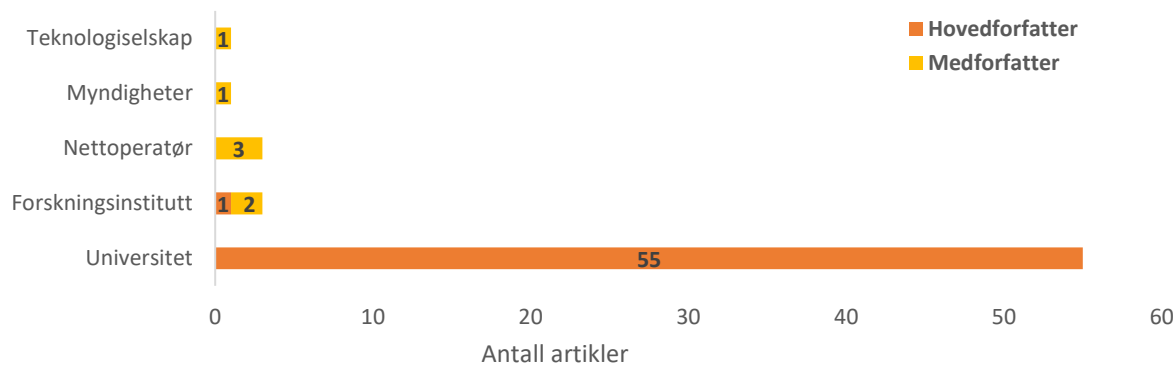


## Lokalisering av forfatters institusjon



Figur 6.2 Oversikt over forfatters land, fordelt på hovedforfattere og medforfattere.

## Forfatterinstitusjon



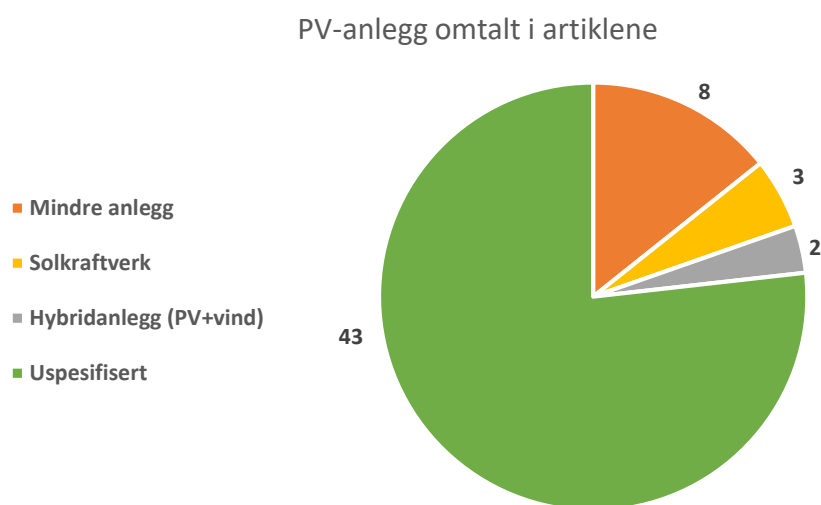
Figur 6.3 Oversikt over type institusjoner som artikkelforfatterne er tilknyttet.

Oversikten viser at det er en stor overvekt av bidrag fra universitet, men det er også bidrag fra forskningsinstitutter, nettoperatører, myndigheter og teknologiselskap. En del av de ikke-akademiske institusjonene har det vært vanskelig å kategorisere, siden de har virksomheter innen flere av kategoriene. Derfor er kategoriseringen basert på et hierarkisk system som følger:

1. Forskningsinstitutt (også tilknytt selskap, når det betegnes som forskningsinstitutt)
2. Nettoperatør
3. Kraftprodusent / strømselskap
4. Teknologiselskap / konsulentselskap

Det var vanskelig å finne pålitelig informasjon om hvilket nivå i kraftnettet nettoperatørene er inne i, og om disse har rolle som TSO eller DSO. Samlebegrepet «nettoperatør» brukes derfor om alle typer netteiere.

Det ble også registrert hva slags PV-anlegg artiklene tok for seg, i tillegg til hva slags nett de var tilknytt. For de fleste artiklene er verken produksjon eller nett-type spesifisert. Fordelinga av produksjon i solkraftverk, mindre anlegg, hybridanlegg (med PV og vind) og uspesifisert er vist i Figur 6.4.



Figur 6.4 Oversikt over fordeling av de ulike typene PV-anlegg artiklene tar for seg

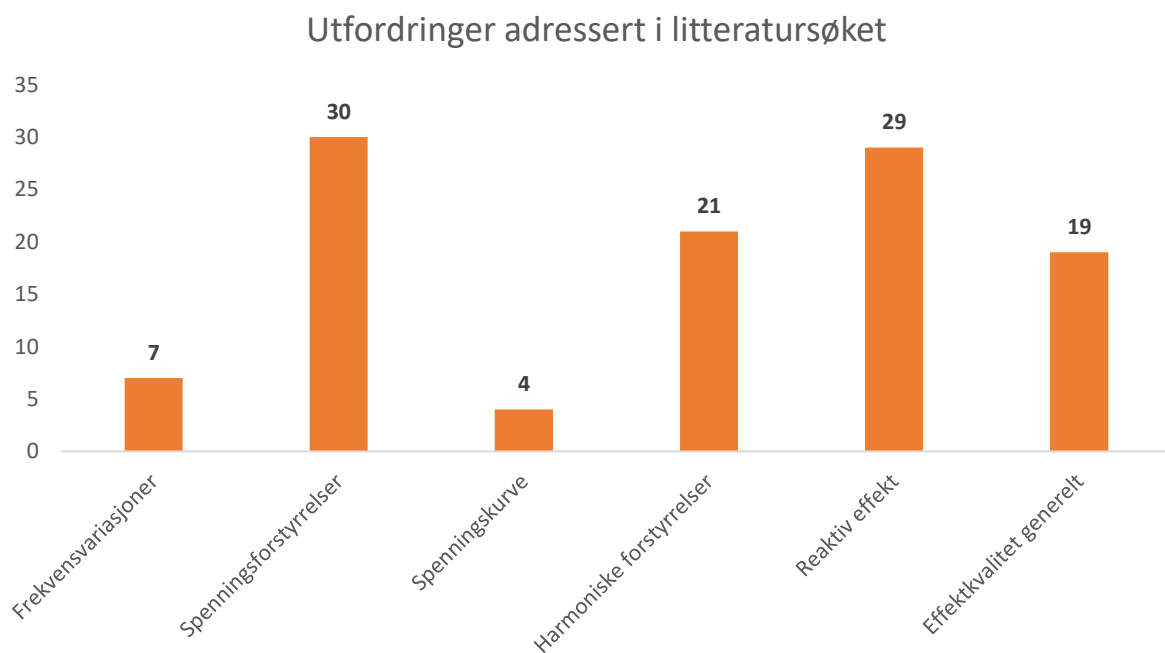
Skillet mellom mindre anlegg og solkraftverk ble satt til 100 kW installert effekt, som tilsvarer grensa for plusskunder som omtalt i 4. Flere av anlegga i kategorien «mindre anlegg» ble i artiklene som «residential PV» eller «distributed generation», og størrelsen på disse ble da ikke undersøkt nærmere. Tilsvarende ble artikler om «PV farm» eller «PV plant» definert som solkraftverk uten at størrelsen på anlegget ble undersøkt noe videre.

Blant artiklene som spesifiserer hva slags nett anlegget er tilkobla, er det tolv anlegg kobla til ordinære LV distribusjonsnett, mens to artikler omhandler LV mikronett.

## 6.2 UTFORDRINGER ADRESSERT

Artiklene i litteratursøket tar for seg et bredt spekter utfordringer og problemer som kan oppstå når ikke-regulerbar kraft fra PV-anlegg kobles inn i det elektriske distribusjonsnettet. De ulike problemene innvirker ofte på hverandre, og er kategorisert etter hva slags problemer artiklene framhever.

Fordelingen av de ulike problemene er vist i Figur 6.5, basert på kategoriseringen fra kapittel 5.1.1.



Figur 6.5 Oversikt over antall artikler som omtaler de ulike utfordringene i litteratursøket.

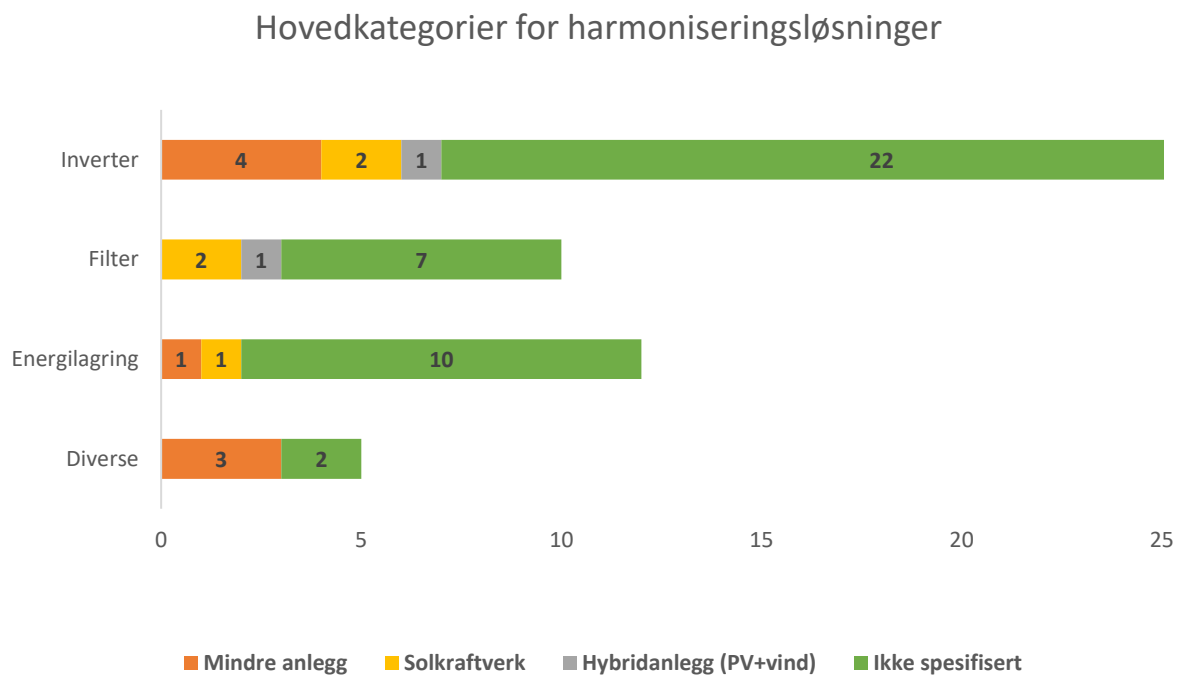
Flere av artiklene i litteratursøket framhever mer enn en utfordring ved effektkvalitet, og det totale antallet problemer adressert er derfor høyere enn antall artikler. Det er også stor variasjon i om artiklene peker på flere utfordringer og problemer, eller om de bare tar for seg generelle problemer tilknyttet effektkvalitet.

Oversikten viser at de mest omtalte kategoriene er spenningsforstyrrelser, reaktiv effekt og harmoniske forstyrrelser.

I tillegg omtales effektkvalitet generelt ofte, mens et fåtall artikler tar for seg frekvensvariasjoner og spenningskurve.

### 6.3 HARMONISERINGSLØSNINGER I LITTERATURSØKET

I artiklene i litteratursøket skisseres det ulike løsninger for å harmonisere eller synkronisere effekten levert fra PV-anlegget mot effekten i det elektriske distribusjonsnettet. Figur 6.6 viser en oversikt over utbredelsen av de ulike løsningene fra litteratursøket basert på hovedkategoriene som omtalt i kapittel 5.1.1. Videre følger en oversikt over løsninger innenfor hver av hovedkategoriene.



Figur 6.6 Kategorisering og fordeling av løsninger for ulike PV-anlegg omtalt i litteratursøket.

Oversikten viser at den mest omtalte løsningen baserer seg på bruk av invertere. Videre er energilagring mest omtalt, før filter og diverse løsninger. Det er verdt å bemerke at alle artiklene benytter invertere i PV-systemet, og at det fleste har en form for filtreringsløsning som del av inverteren. Inndelingen i kategorier er gjort på bakgrunn av hvilken komponent som framheves som viktigst for å sikre effektkvaliteten.

I kategorien diverse er det omtalt løsninger som i større grad baserer seg på beregninger og smarte systemer.

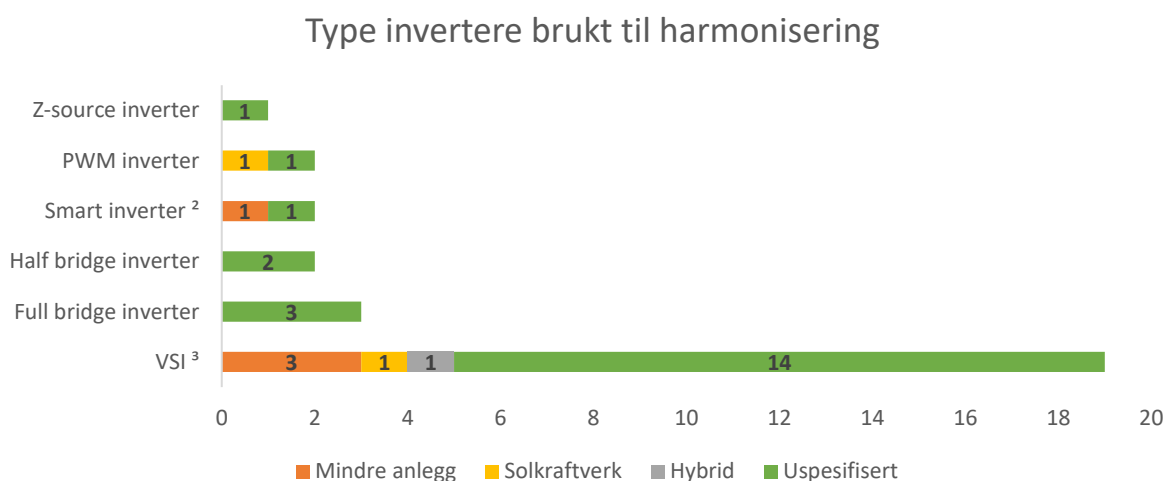
Oversikten viser og at det ikke er store variasjoner mellom de ulike typene anlegg som er omtalt og hvilke harmoniseringsløsninger de tar for seg.'

Alle kategoriene er nærmere omtalt i fordypningen i neste kapittel.

## 7 FORDYPNING I LØSNINGER

### 7.1 INVERTERE

I litteratursøket baserte 29 artikler seg på bruk av inverter til å harmonisere effekten. Oversikt fordelt på ulike typer invertere som er omtalt i kapittel 4.3 er vist i Figur 7.1.



Figur 7.1: Ulike inverter-typer brukt til harmonisering av effekt i artiklene i litteratursøket.<sup>2 3</sup>

Det er her en betydelig overvekt av VSIs. Også inverterne som er spesifisert som PWM, smart, «half bridge» og «full bridge» er varianter av VSI, mens «Z-source» inverteren baserer seg på annet signal, som nevnt i kapittel 4.3.

#### 7.1.1 Smart inverter i mindre anlegg (3,9 kW)

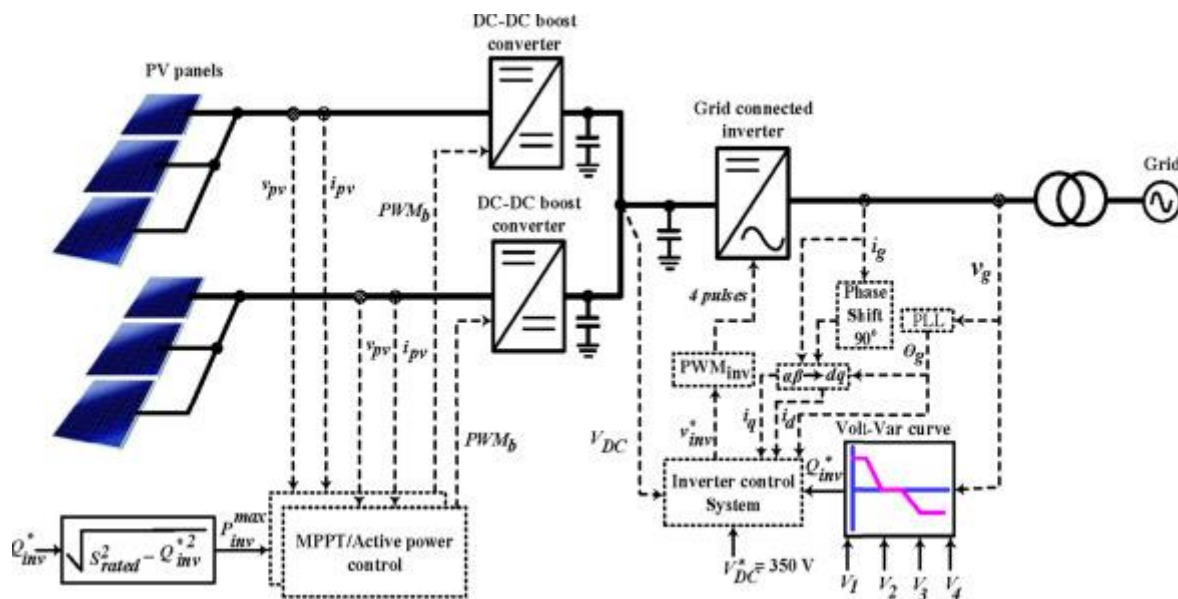
Til fordypning er det her valgt en artikkel fra 2018, basert på en smart inverter i et mindre anlegg: *“Distributed voltage regulation using Volt-Var controls of a smart PV inverter in a smart grid: An experimental study”*. [52]

Systemet baserer seg på bruk av PV-strenger med streng-omformere for DC-booster i kombinasjon med en sentralt plassert inverter, som vist i Figur 7.2 Blant kontroll-strategiene som er implementert er det MPPT tilknyttet DC-boosterne, og inverteren har i tillegg til en Volt-Var-kontroll, kontroll-algoritmer basert på PWM og «phase locked loop» (PLL).

Formålet er å sikre kompensering av reaktiv kontroll på en tilstrekkelig måte. Tradisjonelt brukes FACTS til dette formålet, men disse kan være dyre og ha treg responstid, opp i flere sekunder.

<sup>2</sup> Begge artiklene som omhandler bruk av smarte invertere er skrevet av samme forfatterkollegiet.

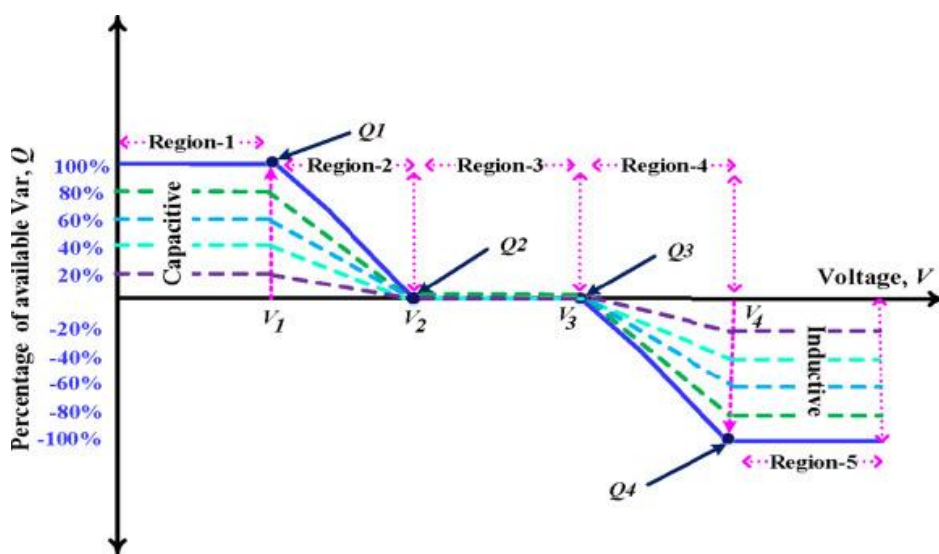
<sup>3</sup> To av artiklene som omhandler bruk av VSI er skrevet av samme forfatterkollegiet.



Figur 7.2: PV-systemet med smart inverter og tilhørende kontroll-mekanismer. Henta fra [52].

Derfor foreslås Volt-Var-kontrollfunksjon som vist i Figur 7.3. Ved hjelp av denne kan kapasitans absorberer reaktiv effekt, og induktans levere reaktiv effekt etter behov.

Løsningen er testa ved «Maui Advanced Solar Initiative Project» på Hawaii.



Figur 7.3: Volt-var-kontrollfunksjon for å kontrollere flyten av reaktiv effekt. Henta fra [52].

Resultata peker på at den reaktive effekten påvirker spenninga i nettet, slik at denne øker når reaktiv effekt tilføres, og spenninga synker når reaktiv effekt absorberes. På grunn av dette kan spenninga på distribusjonsnettet kontrolleres uten å installere flere enheter i nettet.

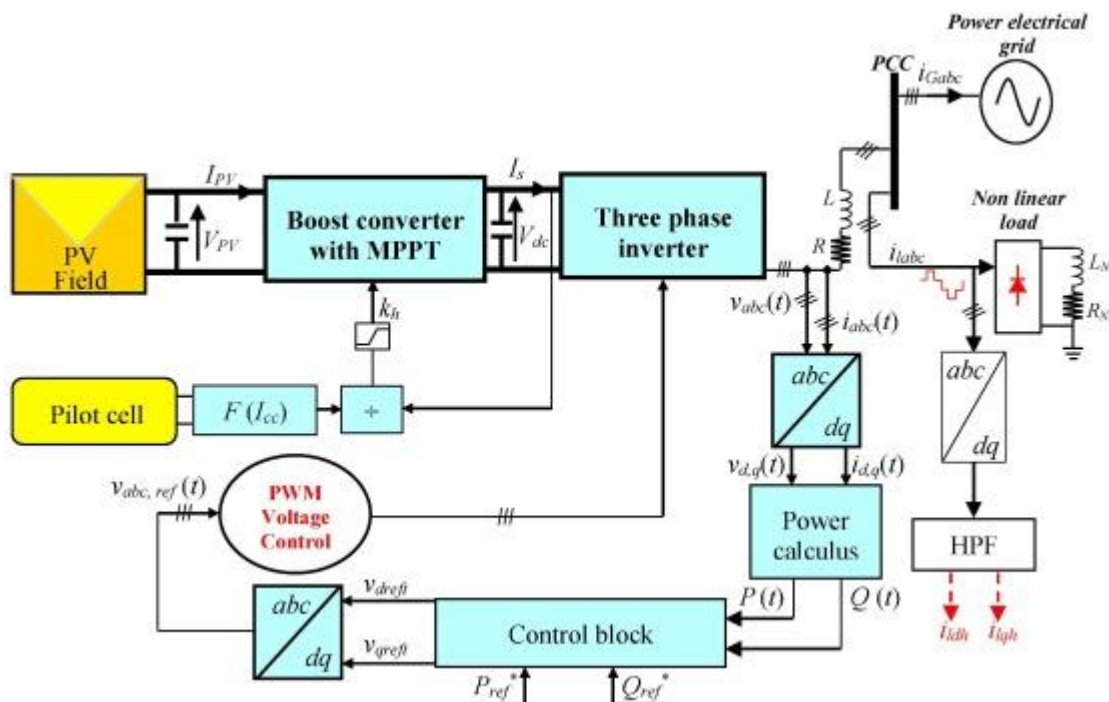
Metoden leverer på å kompensere reaktiv effekt og kontrollere spenning, men den viser noe feilmargin når det gjelder å operere presist i forhold til kurven til input-signalet, og trenger derfor forbedringer.

### 7.1.2 PWM inverter i solkraftverk (400 kW)

Til fordykning er artikkelen "Control and energy management of a large scale grid-connected PV system for power quality improvement" fra 2018 valgt. [53]

PV-systemet består av to PV-strenger på 200 kW-kapasitet hver, en DC-omformer og en trefase PWM inverter. Figur 7.4 viser ei skisse over systemet, med de tilhørende kontrollalgoritmene. Det utarbeides en kontroll-strategi basert på følgende hierarki:

1. Leveranse av høyest mulig effekt
2. Kompensering av reaktiv effekt
3. Aktiv filtrering.



Figur 7.4: Modell av systemet omtalt med PWM-inverter til å redusere reaktiv effekt. Henta fra [53].

PWM inverteren filtrerer spennings-signala ved bruk av brytere som skifter raskt.

Effektkontrollen er basert på «Fuzzy logic control» (FLC) og balansering av effekt/reaktiv effekt ved P-Q-teori. Det benyttes Clarke-transformasjon, som omdanner trefasesystemet til en to-komponent representasjon, som å bidrar til å eliminere harmoniske forstyrrelser og negative komponenter.

I dette systemet brukes det et effektfiler av typen «High pass filter» (HPF), som bidrar til nesten en halvering av THD sammenlikna med uten bruk av filter.

Simuleringer er gjennomført for standard testforhold, og slår fast at systemet kan operere ved høy effekt, og samtidig forbedre effektkvaliteten ved å kompensere reaktiv effekt og bruk av aktivt effektfiler.

Ved å begrense P-Q-metoden med tilpassa strøm-kommandoer, leverer systemet lavere THD.

## 7.2 FILTER

I litteratursøket omtaler 10 av artiklene en form for filter som viktigste komponent for å harmonisere effekten fra PV-anlegget mot det elektriske distribusjonsnettet. Som omtalt i kapittel 4.3 kan filter deles inn i aktive- og passive filtre.

I litteratursøket benytter alle filter-løsningene en form for aktive filtre, selv om de i mange av tilfellene er basert på tradisjonelle, passive filtre. Det er derfor kun valgt ut en artikkel til fordypning i denne kategorien.

### 7.2.1 Effektfiler basert på LC-topografi i mindre anlegg (750 W), 2018

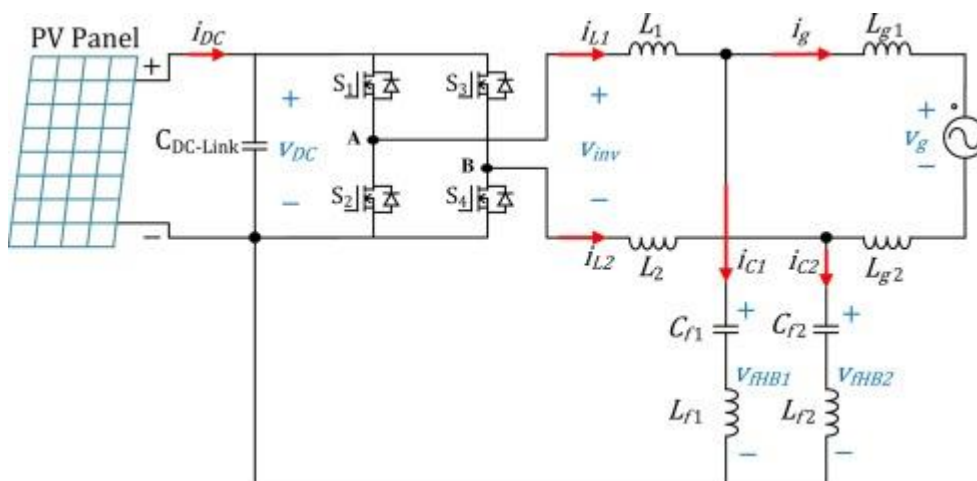
Artikkelen “*Modeling and control for new LLCL filter based grid-tied PV inverters with active power decoupling and active resonance damping capabilities*”. [54]

Funksjonen til RLC-komponenter er omtalt i kapittel 4.3.

Et LLCL-filter kan bidra til forenkling av en enfas invertter uten DC-transformator, men i mange tilfeller avhenger dette av løsninger for energilagring eller kontroll-enheter for å redusere harmoniske forstyrrelser fra DC-siden.

Denne studien utvikler en aktiv kontroll-teknikk basert på å integrere DC- og AC-siden av inverteren med et LLCL-filer, og på den måten redusere behovet for andre enheter til effektkontroll.

Oppsettet som knytter sammen DC-siden med nett-siden er vist i Figur 7.5.



Figur 7.5: Oppsettet til PV-systemet med effektflyten under normal drift med leveranse til nettet. Henta fra: [54].

I tillegg benyttes en kontroll som veksler mellom ulike operasjonsmodus.



Studien skiller mellom «common mode», der det ikke leveres effekt til nettet, og «differential mode» som benyttes til å levere effekt. Under «common mode» vil strømmen passere gjennom filteret, og returneres tilbake til inverteren

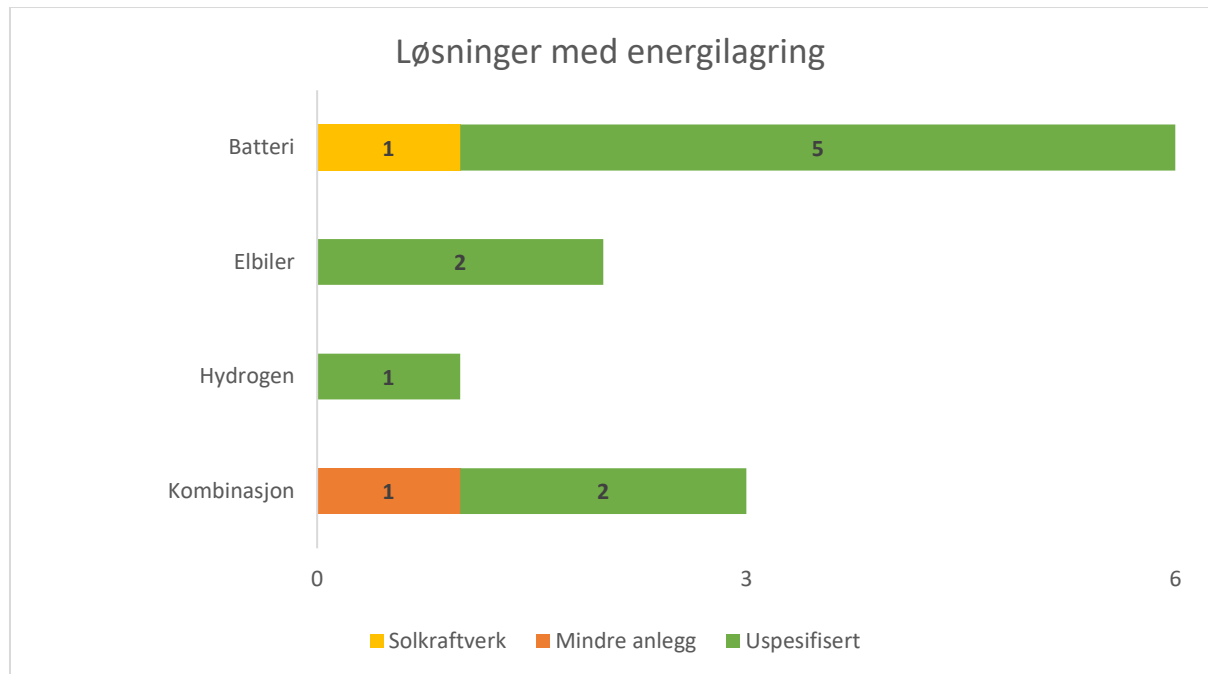
Løsninger som knytter sammen DC- og AC-siden på denne måten har ofte utfordringer med at de blir store og komplekse, men LLCL-oppsettet fra studien bidrar til at inverteren både er kompakt, og at man har fordeler ved å benytte kjent teknologi.

Filterets funksjon er undersøkt ved simulering av et PV-anlegg på 750 W. Resultata viser at systemet fungerer godt til å synkronisere PV-anlegget mot ulike typer distribusjonsnett.

Samtidig kan kondensatoren på DC-siden kan reduseres med hele 40% sammenlikna med en tilsvarende, passiv løsning, uten at dette gir økte forstyrrelser i DC-spenninga. Simuleringa viser og at tap til jording reduseres i systemet.

## 7.3 ENERGILAGRING

13 av artiklene i litteratursøket tok for seg harmonisering av effekten ved bruk av energilagring. Fordeling på lagrings-løsningene fra kapittel 4.3 er vist i Figur 7.6.



Figur 7.6: Fordeling av ulike løsninger for energilagring som er benytta, fordelt på ulike typer PV-anlegg.

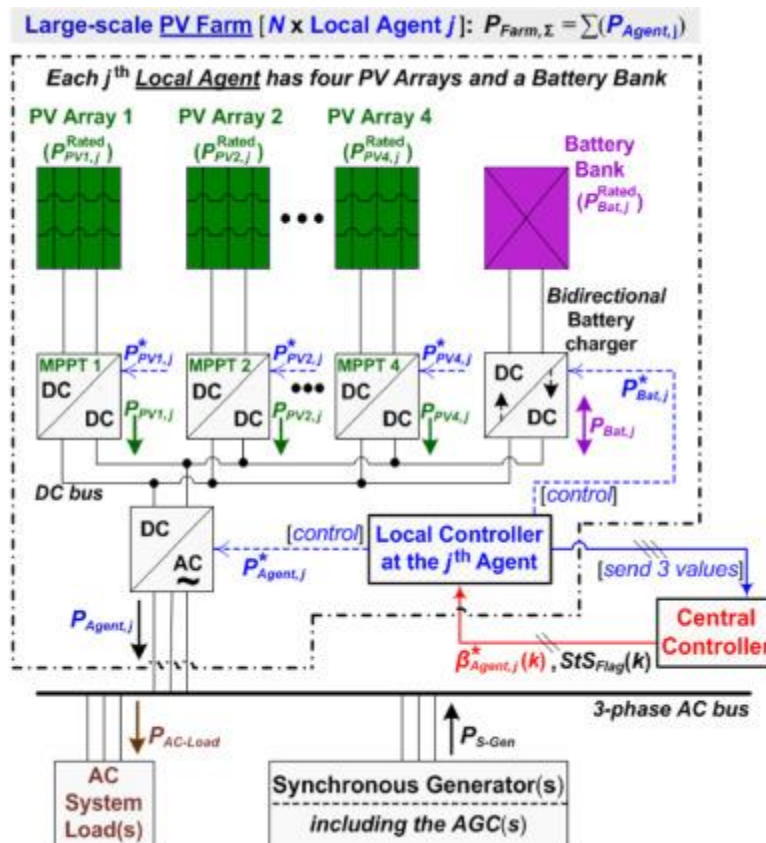
Under kategorien kombinasjon er det en artikkel som benytter løsning med kombinasjonen batteri, superkondensator og hydrogen-lagring i et mindre anlegg. I de uspesifiserte anlegga er det en artikkel med kombinasjonen superkapasitor og hydrogen-lagring og en med batteri og superkapasitor.

### 7.3.1 Batteri i solkraftverk

Artikkelen *“A two-level control strategy with fuzzy logic for large-scale photovoltaic farms to support grid frequency regulation”* fra 2017, tar for seg et solkraftverk med energilagring i en sentralt plassert batteribank. [55]

PV-systemet er basert på et to-nivå kontrollsystem basert på FLCer for å justere effekten levert fra systemet ut på distribusjonsnettet.

Kraftverket har en kontroll-enhet sentralt plassert, som koordinerer kontrollene ute ved lokale PV-agenter. Hver av disse agentene består av fire PV-strenger og et batteri, regulert av en lokal kontroll.



Figur 7.7: Modell av PV-systemet viser sammenhengen mellom en lokal agent med fire PV-strenger, et batteri, DC-boostere for hver streng og en DC-AC-inverter som styres av en lokal kontroll med signaler fra den sentrale kontrollen. [55]

Den sentrale kontrollen er en automatisk FLC, som beregner riktige referanseverdier som distribusjonsnett, og bryter dette ned til lokalt tilpassa referanseverdier til agentene.

De lokale kontrollene leverer effekt ut på nettet i tråd med referansesystemet de har fått tildelt, i tillegg til å kontrollere det lokale batteriets «state of charge» (SoC) innenfor 20-80% av maksimal kapasitet.

Videre utføres simuleringer, som slår fast at systemet fungerer godt med hensyn til å levere effekt som er harmonisert med effekten på distribusjonsnett. Frekvensen holdes stabil innenfor akseptabelt intervall på  $\pm 0.05$  Hz i normal driftsmodus.

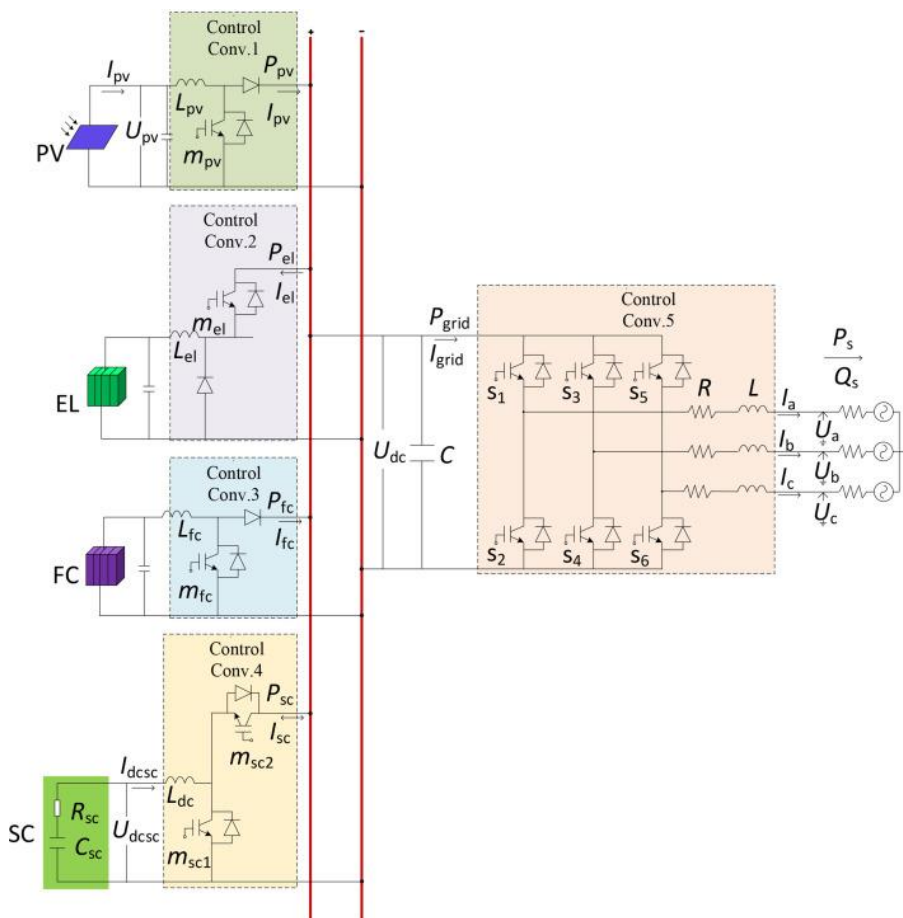
Etter å ha slått fast at strategien fungerer på et PV-anlegg, gjøres simuleringer i et område med fire solkraftverk. Disse viser at metoden lar seg anvende også på større områder, og effektflyten i systemet holdes innenfor hva kraftnettet har kapasitet til.

Det foreslås videre studier for å se på desentraliserte mekanismer for å kontrollere områder med både solkraftverk, og boliger og næringsbygg som får kraftforsyning fra solkraftverket. I tillegg bør de økonomiske sidene ved denne typen system vurderes.

### 7.3.2 Energilagring i superkondensator og hydrogen

Til fordykning i energilagringssystem ble artikkelen «Modeling, control and simulation of a photovoltaic /hydrogen/ supercapacitor hybrid power generation system for grid-connected applications» fra 2019 valgt. [56].

Denne tar for seg et hybridsystem med PV og lagring ved hjelp av en superkondensator-bank (SC), et system for elektrolyse (EL) og en brenselcelle («fuel cell», FC). Hver av disse komponentene har egne kontrollsystemer, og det er i tillegg et sentralt kontrollsystem til å koordinere det hele. En oversikt over systemet vises i Figur 7.8.



Figur 7.8 Oversikt over hybridsystemet med PV, EL, FC og SC, samt tilhørende kontrollsystemer. Henta fra [56].

Kort fortalt baserer anlegget seg på at det produseres effekt fra PV-anlegget som fortrinnsvis leveres ut på det elektriske distribusjonsnettet. Ved effektoverskudd benyttes elektrolyse for å lagre brensel i form av hydrogen, som forbrukes i brenselcella for å produsere effekt når det er underskudd i distribusjonsnettet og PV-modulene ikke leverer tilstrekkelig.

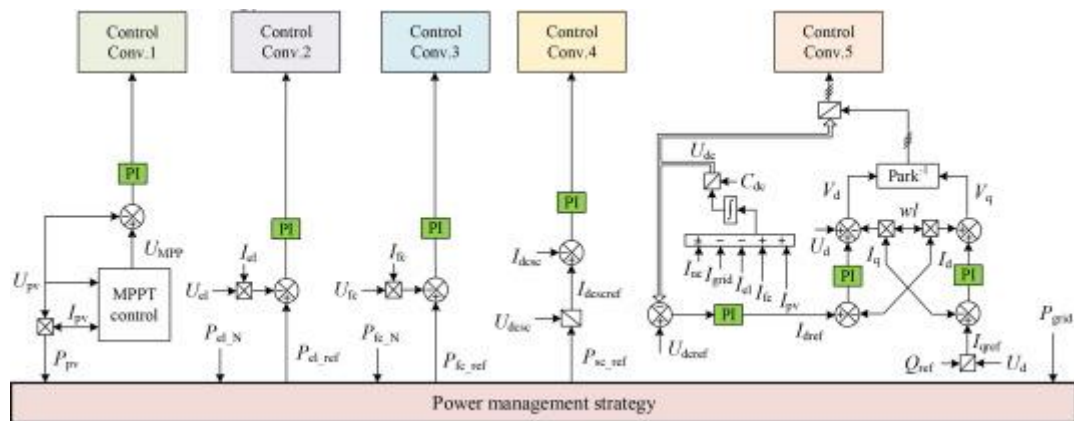
Systemet med EL og FC har lang responstid, og derfor suppleres det med SC-banken for å håndtere raske endringer i spenninga i den felles DC-busen (markert i rødt i Figur 7.8). Energibalansen i systemet kan uttrykkes ved:

$$P_{grid} = P_{PV} - P_{EL} - P_{FC} \pm P_{SC} , \quad (1)$$

der  $P_{grid}$ ,  $P_{PV}$ ,  $P_{EL}$ ,  $P_{FC}$  og  $P_{SC}$  er effektflyten fra henholdsvis distribusjonsnettet, PV-modulene, elektrolysesystemet, brenselcelle og superkondensator.

For å kontrollere spenninga i systemet, er både SC, EL, FC og PV-enhetene tilknyttet PI-kontroller, i tillegg til at PV-modulene har en MPPT-kontroller for å sikre at disse opererer så effektivt som mulig.

De sentrale kontroll-algoritmene baserer seg på flere proporsjonale integral («proportional integral», PI)-looper, i kombinasjon med flere andre kontroll-looper, som vist i Figur 7.9.



Figur 7.9 Kontrollsystemet for hybridsystemet med energilagring. Henta fra [56].

Gjennom simuleringer slås det fast at systemet er en lovende måte å kontrollere effektflyten til distribusjonsnettet på. Med en effektiv kontrollstrategi og energilagring som både håndterer raske endringer (i SC) og lagring av mengder energi (hydrogen med EL og FC) slik at effekten fra PV-anlegget utnyttes bedre.

Artikkelen peker også på at det trengs videre modellering for å se på begrensninger ved hydrogenlagring og kondensatorenes SoC-begrensninger under ulike forhold.

## 7.4 DIVERSE LØSNINGER - SANNTIDSBEREGNING

Fire av artiklene i søket passet ikke inn under de tre første kategoriene, og er omtalt som «diverse løsninger». Oversikt over løsningene og type PV-anlegg disse artiklene omtaler er vist i Tabell 7.1.

Tabell 7.1 Løsninger i litteratursøket som ikke er omtalt under andre kategorier.

	Løsning	Type PV-anlegg
1.	Kraftsystem-overvåkning (“Power system monitoring», PSM)	Uspesifisert
2.	Stabilisator for kraftsystem (“Power system stabilizer”, PSS)	Uspesifisert
3.	Forutsigende kraftflytmodell (“Probabilistic harmonic load flow model”)	Mindre anlegg
4.	Sanntidsberegning (“Nowcasting”)	Mindre anlegg
5.	Null effektflyt-kontroll (“Zero power flow”)	Mindre anlegg

### Kraftsystemovervåkning, PSM

Omfatter en metode for «power system monitoring» ved hjelp av kunstig intelligens («Artificial intelligence», AI). Bruken av AI sammenliknes med tradisjonelle systemer med regulering av effektkvalitet gjennom bruk av invertere, DVR, STATCOM, UPQC eller energilagring. Systemet med AI er enklere å regulere, og har raskere responstid. I tillegg er AI-systemet enkle å operere i ulike moduser og bytter enkelt mellom disse, for eksempel mellom normal operasjonsmodus og modus for feilhendelser (kjent som «fault ride through»). Ulempen med AI-systemet er at det krever stort minne, men ikke-veiledet maskinlæring bidrar med mange muligheter, fordi dette ikke krever et stort datagrunnlag for å kunne implementeres.

### Stabilisator for kraftsystem, PSS

En PSS-løsning basert på desentralisert design plassert sentralt i nettet kan tradisjonelt bidra til ustabilitet i distribusjonsnettet, men ved å bruke «retrofit control theory» løses dette problemet. Kontroll-systemet bidrar med reduksjon i harmoniske forstyrrelser, og forbedringer er bevist gjennom simuleringer der tradisjonelle løsninger sammenliknes med forbedra PSS.

### Forutsigende kraftflytmodell

Modeller som forutser effektflyten i et kraftsystem bidrar til enklere regulering av distribusjonsnettet. Ved å ha gode nok modeller til å forutsi effektflyten kan andelen effekt levert fra PV-anlegg økes, men forutsigende modeller alene ikke er nok for å eliminere effektutfordringer når PV-andelen blir «veldig stor» (uten at denne grensa er definert).

#### 7.4.1 Sanntidsberegning (“Nowcasting”)

Til fordypning er det valgt artikkelen «Sensor network based PV power nowcasting with spatio-temporal preselection for grid-friendly control» valgt. Denne er fra 2019, og baserer seg på et mindre PV-anlegg. [57]

Løsningen som skisseres her er en form for sanntidsberegning eller «nowcasting».

Studien omtaler en form for nettvennlig kontroll («grid friendly control»), som har begrensninger når det kommer til å estimere tilgjengelig effekt i sanntid, særlig ved raske endringer som når et PV-anlegg skyggelegges av skyer i rask bevegelse.

En måte å løse dette på er ved bruk av spatiotemporal strategi. En spatiotemporal database håndterer informasjon om både rom og tid, gjerne for objekter som beveger seg, som skyer. Studien peker på at spatiotemporal sanntidsberegning har begrensninger ved at de fungerer dårlig hvis prediktorene er dårlig tilpassa, og at sanntidsberegningen er lite fleksibel, slik at det er tungvint å gjøre tilpasninger for å bedre funksjonen.

Studien foreslår en forbedring av sanntidsberegning ved hjelp av forhåndsdefinering av gjenkjennbare situasjoner («Scenario recognizable preselection», SRP).

Simuleringer er gjort for å verifisere metoden, og disse viser at den gir raske og presise valg av prediktorer for ulike situasjoner, og gir presise sanntidsberegninger for PV-anlegg og informasjon om skyenes bevegelser.

Metoden fungerer for situasjoner med ulike værforhold, samtidig som den trenger mindre data for trening av metoden enn tradisjonelle spatio-temporale strategier.

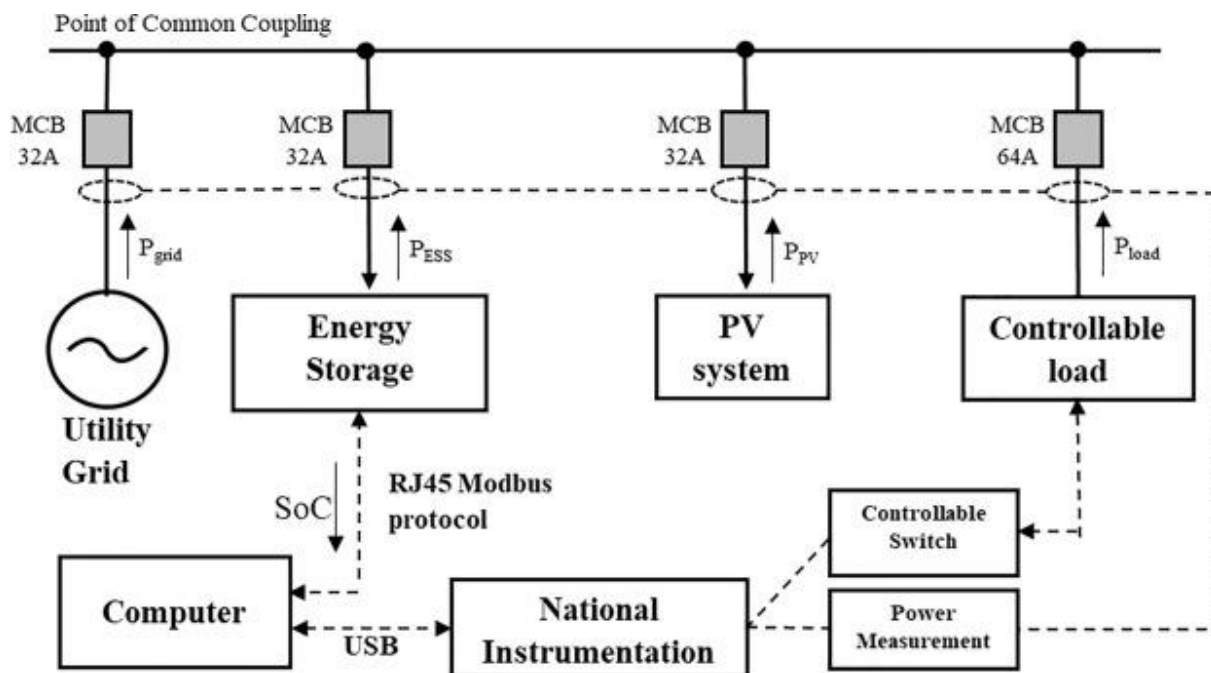
Metoden er også testa i et nettvennlig kontrollsystem, og simuleringene viser at dette er en lovende metode for framtida.

#### 7.4.2 «Zero power flow» i mindre anlegg

“Proportional integrator (PI) and fuzzy-controlled energy storage for zero-power flow between grid and local network with photovoltaic system” fra 2020 er brukt til fordypning her. [58]

Dette er en studie som baserer seg på bruk av energilagring, men på grunn av funksjonen som tilstreber å oppnå null effektflyt til nettet, er den regna med til «diverse» løsninger.

Figur 7.10 viser oppsettet for anlegget og kontrollmekanismene.



Figur 7.10: Oppsett av PV-systemet som tilstreber null effektflyt mot nettet. Henta fra [58].

Det gjøres forsøk med to ulike kontroll-typer: En basert på proporsjonalt integraler (PI) og en basert på «fuzzy logic» (FLC) i kombinasjon med energilagring i kondensatorer og batteri.

Simuleringer slår fast at kontrollene har ulike fordeler. Ved varierende produksjon av kraft fra PV-systemet, viser PI-kontrollen seg å være mer effektiv på å tilpasse effektflyten ut i nettet. Dette er blant anna fordi FLCen tar hensyn til batteriets SoC, som reduserer reaksjonstiden og hvor adaptivt systemet er.

Konklusjonen er at FLC bidrar til å gi en jevn effektflyt ut på nettet, og er derfor godt egna i områder der PV-produksjonen endres raskt på grunn av for eksempel skyer som passerer. Den fungerer også godt sammen med blybatterier med behov for SoC-restriksjoner.

Tilsvarende er PI-kontrollen bedre på å oppnå null effektflyt, noe som kan være ønskelig for forbrukere som ønsker å være mest mulig selvforsynte. Likevel passer disse best i kombinasjon med superkondensatorer eller batterier uten behov for like strenge SoC-restriksjoner, som batterier basert på litium-ioner.



## 8 DISKUSJON OG VURDERINGER

---

### 8.1 LITTERATURSØK

Litteratursøket omtalt i kapittel 6 dreide seg rundt spørsmålet:

*Hvilke tekniske løsninger utvikles for å sikre harmonisering av effekten levert fra PV-anlegg mot det elektriske distribusjonsnettet?*

#### 8.1.1 Metode og artikkelutvalget i litteratursøket

I litteraturstudien er det ført en oversikt over et utvalg med 56 artikler innen et område der det skjer stor utvikling. Det legges til grunn en antakelse om at søket gir et representativt bilde på teknologiske løsninger for å sikre harmonisering av effekt mot distribusjonsnettet, og det er benytta et sett søkekriterier nettopp for å redusere antallet artikler slik at den totale mengden skulle bli håndterlig for en masteroppgave. I tillegg er artiklene i søket kun basert på artikler som er tilgjengelig gjennom nettverket ved NMBUs nettverk, og artiklene fra IEEE i søket er derfor kun artikler som er åpent tilgjengelig.

Dette gjør at utvalget artikler er ganske lite, noe som gir betydelig usikkerhet rundt hvor representativt det er. Ved å benytte mer åpne kriterier ville det gitt en sterkere antakelse om at oversikten er representativ. Det kunne vært gjort ved å benytte flere databaser for søk, eller ved å bruke søkestrengen til å søke i titler, sammendrag og nøkkelord, og framfor kun titler, slik det ble gjort i dette søket.

Som nevnt i innledningen var det et ønske om å få en oppdatert oversikt over forskning på teknologiske løsninger for å sikre leveringskvalitet fra PV-anlegg. Siden veksten i installert PV-kapasitet har raskt siden 2010 på verdensbasis og siden 2015 i Norge, ble det naturlig å se på perioden fra 2015 og framover. Til grunn for dette ligger en antakelse om at feltet har vært interessant for forskning etterhvert som utbredelsen av PV har økt, og at arbeidet som danner grunnlaget for artiklene publisert i 2015 ligger enda et par år tilbake i tid.

For de definerte søkekriteriene var det i det automatiske søket ytterligere 22 treff fra perioden 2003-2014. For IEEE-artiklene var det ikke treff på de gitte søkekriteriene før i 2017. Dette er med på å bekrefte at interessen for fagområdet kan ha økt i takt med utbygd PV-kapasitet.

Videre i litteratursøket ble det ført oversikt over hvilke land forfatterne av artiklene hører til i, gjennom hvor institusjonene de er tilknyttet er lokalisert. Det er i stor grad overlapp mellom landa som i kapittel 0 nevnes blant de ti landa med størst økning i installert PV-kapasitet i 2019, og land med vesentlig andel bidrag i dette søket. Kina, India, Japan og Australia er blant landa som har stor økning i PV-kapasitet, og med mange bidrag som er telt med.

Land som Algerie, Malaysia, Danmark, Frankrike og Iran er land som utpeker seg med flere bidrag i søket, men som ikke nevnes blant de største PV-nasjonene. Likevel har også disse landa vesentlig utbygd PV-kapasitet. [59]

Den største overraskelsen i oversikt over land med bidrag i søket er Tyskland, som pekes på blant de fem største PV-nasjonene og som også er landet med størst andel PV i sin kraftmiks. Likevel er det bare ett bidrag fra Tyskland i søket. Det kunne også vært venta flere bidrag fra Spania og Ukraina, men det er verdt å merke seg at utvalget artikler er lite i forhold til hvor stort fagfeltet er, og som det allerede er pekt på er det en svak antakelse om at bildet er representativt for virkeligheta.

Videre i oversikten er det vist en sterk overvekt av bidrag i søket fra forfattere tilknyttet universiteter. For øvrig er det noen bidrag fra medforfattere tilknyttet forskningsinstitutt, nettoperatører, myndigheter og et teknologiselskap. Ved vurdering av «Technology Readiness Level» er det vanlig å anta at en slik overvekt av universiteter og forskningsinstitutt tyder på at teknologien er umoden, og foreløpig tatt i bruk i liten grad.

Siden denne masteroppgava er et akademisk arbeid, er det også naturlig å fokusere søket inn på forskning, i tillegg til at det er vanskelig å gjøre systematiske søk i vanlige søkemotorer som Google. Dette søket er derfor utført i akademiske databaser, som gir god oversikt på forskningsartikler, men er lite egna til å fange opp artikler og rapporter fra nettoperatører, teknologiselskaper og andre organisasjoner. Innen universiteter og forskningsinstitutt er dessuten det å produsere artikler og rapporter en vesentlig del av hva institusjonene måles på og får finansiering for, i motsetning til de andre aktørene nevnt.

Basert på dette er det ikke overraskende med en slik overvekt av akademiske bidrag, uten at dette trenger å bety at teknologien er umoden. Tvert imot er det ved vanlige Google-søk mye litteratur å finne fra ulike organisasjoner og selskaper, noe som bygger opp om antakelsen om at teknologi for å harmonisere effekt fra PV mot distribusjonsnettene ikke er på et umodent stadium.

Likevel er det et stadig behov for å forbedre denne, og siden det fortsatt gjøres mye forskning på feltet kan det antas at løsningene omtalt i litteratursøket kan bli del av framtidens løsninger for å møte de kommende utfordringene med økt grad av solkraft i distribusjonsnettene.

### 8.1.2 Kategorisering av problemene og løsningene

Fordeling av utfordringene og løsningene artiklene fra litteratursøket er vist i henholdsvis kapittel 6.2 og 6.3, og er basert på kategoriseringen som er vist i kapittel 5.1.1.

Det er stor forskjell på hvor detaljerte artiklene er når det gjelder å peke på problemene og utfordringene når PV kobles til det elektriske distribusjonsnettene. For eksempel har enkelte artikler pekt på fire veldig konkrete problemer, mens andre bare peker på mer generelle utfordringer, som omtales som effektkvalitet generelt. Denne forskjellen i detaljnivået gjør at det overordna bildet av ofte hvor problema er adressert ikke blir helt representativt.

Fra Figur 6.5 ser vi at de utfordringene som oftest er omtalt er spenningsforstyrrelser og reaktiv effekt. Videre er det et stort antall artikler som omtaler harmoniske forstyrrelser og effektkvalitet generelt. Dette gjenspeiler bekymringene om at økning i solkraft utfordrer leveringskvalitet i kraftsystemet, og at overføringskapasiteten utfordres når distribuert kraftproduksjon bidrar til at effektflyten går fra å være enveis til toveis.

Det er ikke like mange artikler som omtaler frekvensvariasjoner. En mulig grunn til dette er at søket ikke er innretta mot løsninger for å balansere kraftforbruk og –produksjon, og dermed heller ikke regulering av frekvensen. Likevel er bedre frekvensregulering også en naturlig del av at det søkes bedre samhandling mellom PV-systemet og resten av kraftsystemet, for eksempel gjennom bedre planlegging av produksjon.

Det at få artikler tar for seg utfordringer med spenningskurve er heller ikke spesielt overraskende. Dette er en veldig konkret underkategori, som også henger tett sammen med harmoniske forstyrrelser og andre spenningsforstyrrelser, som vist til i kapittel 3.3

Oppsummert er inntrykket at utfordringene som adresseres i søket stemmer godt overens med utfordringene norske aktører som Statnett og NVE har pekt på i Norge. Dette gir grunn til å anta at løsningene kan være relevante til bruk også i norske PV-anlegg kobla inn i distribusjonsnettet.

Som vist i kapittel 4.3 består de fleste PV-systemer av flere enheter for bearbeiding og omforming av effekten som produseres. I artiklene i søket varierer det hvilken del av PV-anlegget som framheves som det viktigste bidraget til effektkvaliteten, og hvordan disse er omtalt. I tillegg er det vanlig at studiene tar for seg forbedringer i flere deler av PV-anlegget, og det er ikke alltid like klart hvilken del som bidrar til størst forbedring av kvaliteten i effekten levert ut i nettet. Det er derfor flere gode forslag til løsninger i artiklene som ikke er omtalt i oppsummeringa av løsninger.

Sjansen for at en løsning er telt med er større for enheter og kontroll-strategier som er lokalisert ved nett-siden i PV-anlegget, og dermed bidrar til den siste justeringa av effekten før den leveres ut. Dette gjør at forbedringer på DC-busen og DC-boostere nærmere PV-modulene i anlegget ikke er regnet med som løsning for noen av artiklene i utvalget, selv om også disse ledda har betydning for effektkvaliteten.

Figur 6.6 viser at det er en overvekt av ulike løsninger for å harmonisere effekt ved bruk av inverter-funksjoner, sett opp mot energilagring og bruk av filter. I tillegg kommer en løsning basert på bruken av en sentral kontroll-enhet for å stabilisere kraftsystemet, samt løsninger som var mindre avhengig av den fysiske enheten. Disse forbedra effektkvaliteten ved bruk av smarte løsninger som baserer seg på bedre samhandling mellom nett og produksjon.

## 8.2 FORDYPNING I LØSNINGER

I fordypninga i artiklene ble det mulig å se på virkninga av hele PV-systemet, og ikke bare den ene framheva løsningen som ga grunnlaget for oversikten i kapittel 6.

Invertere utgjør antakelig den viktigste komponenten for å sikre at kraft fra PV kan leveres ut i et kraftnett, og det er ikke tilfeller av artikler i studien som ikke inkluderer en slik en i PV-anlegget. Det er derimot stor variasjon i hvordan disse er utforma, hva slags komponenter som inngår i disse og hvor avanserte kontrollsystemer de er tilknytta. I kategoriseringen er filter skilt ut som en egen komponent, men disse er oftest en integrert del av inverteren. De aller fleste artiklene i litteraturstudien har en form for filter i de PV-systema som er beskrevet.

Det er vanskelig å sette de ulike løsningene i litteratursøket opp mot hverandre, siden løsningene er svært forskjellige og fordi de er vurdert ut fra veldig ulike parametere i forsøka de omtaler. Alle artiklene som er gjennomgått presenterer løsninger som bidrar til å redusere utfordringene ved å koble PV-anlegg inn i distribusjonsnettet. Artikler innenfor alle løsningskategoriene peker at løsningene bidrar til å redusere utfordringer med effektkvalitet generelt og at de bidrar til jevn effektflyt i kraftnettet. Sistnevnte gjelder særlig innenfor løsningene basert på energilagring, som naturlig nok gir god kontroll på når og hvordan effekt skal leveres ut på nettet.

I de fleste artiklene baserer løsningene seg på økt samhandling mellom PV-anlegget og distribusjonsnettet. Dette innebærer at PV-anlegga ikke bare tilpasser effekten som leveres til de aktuelle kvalitetene på nettet, men også bidrar til å løse utfordringer. Dette gjelder for begge artiklene som omhandler bruk av invertere, som oppdager og kompenserer reaktiv effekt, og bruker aktivt kontroll-mekanismer til å utføre forbedringer av effekten som leveres ut.

Artiklene med inverter-løsninger viser også til redusert THD i effekten levert ut fra systemet. Virkninga av redusert THD er en av kvalitetene som undersøkes i studiene som er målbar, og begge løsningene peker på gode resultater for den type anlegg de er brukt i.

I kategorien diverse er det benytta løsninger som i langt større grad baserer seg på kontroll-mekanismer enn løsningene i de øvrige kategoriene, og som derfor skiller seg betydelig ut fra de andre løsningene. Begge artiklene som er gjennomgått her framhever løsninger som er «nettvennlige», og baserer seg på at man gjennom god planlegging kan tilpasse systemet etter forventna kraftproduksjon fra PV.

Løsningene som er gjennomgått er tilpassa både små og store PV-anlegg, og vil kunne bidra til forbedringer i håndteringa av effekt fra solkraft i Norge i tiåra framover. For eksempel kan det ventes at løsningen for null effektflyt mot nettet kan være særlig interessant for plusskunder med ønske om å bli selvforsynt med energi i deler av året, siden den også gir nettilknytning som sikrer tilgang på kraft i deler av året med mindre solinnstråling.

Den store veksten i PV i tilknytning til boliger viser også at det er stor interesse hos vanlige strømkunder, og med lavere batteripriser kan dette bli en driver for at det blir vanligere med energilagring i tilknytning til private PV-anlegg.

Løsningen som ser på bruk av smart inverter i et mindre PV-anlegg er også eksempel på en løsning som kan bli interessant, fordi denne gir et forslag til hvordan en inverter kan forenkles basert på kjente LC-komponenter. Det pekes på at dette gir en mer kompakt inverter, noe som er interessant ved bruk i små anlegg i tilknytning til boliger. I tillegg kan bruken av færre, men godt utprøvde komponenter bety at løsningen ikke blir fordyrende.

Blant lagringsløsningene er det pekt på at batterier og kondensatorer har ulike fordeler, mens løsningen basert på hydrogen trenger forbedringer for å kunne fungere godt i et PV-system av typen som ble gjennomgått.

Det er også mulig å se for seg at man kan kombinere flere av løsningene som er gjennomgått, for eksempel er det ikke unaturlig å tenke forbedringer i invertere sammen med energilagring for plusskunder som ønsker å bli mer selvforsynte med strøm.

Dette er heller ikke i kontrast til å ta i bruk AI og smartere sentral styring av distribusjonsnett.

## 9 KONKLUSJON

---

Utgangspunktet for denne masteroppgava var å undersøke spørsmålet:

*Kan Norge møte framtidens behov for tilstrekkelig effektkvalitet i distribusjonsnettene med økt innblanding av nettilknyttede PV-anlegg?*

Dette ble undersøkt gjennom en litteraturstudie basert på søk i akademiske databaser, og resultatene ble sammenstilt for å gi et oversiktsbilde på hvilke utfordringer knyttet til effektkvalitet som omtales, og ulike løsninger som presenteres i nyere forskning. Deretter ble løsningene fra et utvalg av artiklene gjennomgått.

Artikkelutvalget i litteratursøket gir et oppdatert bilde på forskning innen området som ble undersøkt. Overvekt av bidrag fra akademiske institusjoner kan gi en pekepinn på at løsningene som undersøkes er på et tidlig TRL-stadium, noe som ikke er unaturlig siden søket ble rettet inn mot forskning. Det må bemerkes at dette ikke betyr at teknologi for å harmonisere effekt fra PV-anlegg mot distribusjonsnettene generelt er et umodent felt, men at det i stor grad er snakk om videreutvikling og forbedring av løsninger som allerede finnes.

Gjennom søket er det funnet flere lovende løsninger for å harmonisere effekt fra PV-anlegget mot distribusjonsnettene. Alle artiklene omtaler løsninger som gir bedre effektkvalitet. De fleste av disse baserer seg på forbedringer gjennom bruk av invertere, mens noen peker på forbedrede effektfilter eller systemer basert på energilagring.

I tillegg gir både litteratursøket og fordybninga forslag til løsninger som kan brukes både på små anlegg og på større solkraftverk. Blant artiklene som inngår i løsningskategorien «diverse» er det også flere forslag til løsninger basert på kontroll-strategier som lokaliseres sentralt i distribusjonsnettene, for eksempel hos en nettoperatør.

Tradisjonelt sett har PV-anlegg i Norge vært forholdsvis enkle installasjoner, med hovedvekt på frittstående løsninger med enkle PV-moduler og små batterier tilknyttet. Den framtidige veksten i PV-anlegg er ventet å komme som en miks av små og store nettilknyttede anlegg, gjerne i tilknytning til boliger og næringsbygg.

Løsningene som presenteres i denne litteraturstudien er godt egnede til bruk i begge disse typene PV-anlegg, og det er heller ikke unaturlig å tenke at det er mulig å kombinere flere av dem. Særlig kan enkle batteri- og superkondensatorløsninger være interessante for forbrukere som ønsker å bli mer selvforsynte, mens mer kompakte invertere med færre, men robuste, komponenter er interessante både på grunn av størrelse og levetid.

For nettoperatører kan det være interessant å utvikle distribusjonsnettene til å bli smartere, for eksempel ved bruk av AI, prediksjonsmodeller og sanntidsberegninger.

Med bakgrunn i løsningene som er undersøkt, er det grunn til å tro at Norge kan møte framtidens behov for tilstrekkelig effektkvalitet, selv med omfattende utbygging av PV-kapasitet.

## 9.1 VIDERE STUDIER

Det er i denne oppgava gjort en innledende studie på løsninger for å harmonisere effektkvalitet fra PV-anlegg ut til distribusjonsnett, og konklusjonen er at det er mange lovende løsninger, og at det kan tenkes at disse kan brukes sammen.

Dette trengs det videre studier for å slå fast.

I tillegg kan det være interessant å gjøre nærmere undersøkelser av distribusjonsnetta i artiklene, for å undersøke om disse tilsvarer norske distribusjonsnett, og på den måten slå fast at løsningene er brukbare i Norge.

Det kan også være interessant å gå nærmere inn på kontrollmekanismene som styrer PV-anlegga, og se på hvordan disse kan brukes til økt digitalisering og automatisering av kontrollen av distribusjonsnett.

## REFERANSER

---

- [1] Forente Nasjoner (FN), «FNs bærekraftsmål,» 30. november 2020. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal>. [Funnet 7 desember 2020].
- [2] Miljødirektoratet, «Spesialrapport om 1,5 graders global oppvarming,» [Internett]. [Funnet 30. November 2020].
- [3] H. Ritchie, «Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?,» 18. september 2020. [Internett]. Available: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>. [Funnet 7. desember 2020].
- [4] H. Ritchie, «Energy mix,» [Internett]. Available: <https://ourworldindata.org/energy-mix>. [Funnet 7. desember 2020].
- [5] C.A Veie m.fl., «Analyse og framskrivning: Kraftproduksjon i Norden til 2040,» Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo, 2019.
- [6] Norges vassdrags- og energidirektorat, «Solkraft,» 1. November 2019. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/energiforsyning/kraftproduksjon/solkraft/>. [Funnet 30. November 2020].
- [7] Ø. Grøn, «Likestrøm,» Store norske leksikon, 4. februar 2019. [Internett]. Available: <https://snl.no/likestrøm>. [Funnet 11. desember 2020].
- [8] Ø. Grøn, «Vekselstrøm,» Store norske leksikon, 8. desember 2019. [Internett]. Available: [snl.no/vekselstrøm](https://snl.no/vekselstrøm). [Funnet 11. desember 2020].
- [9] Ø. Grøn, «Elektrisk spenning,» Store Norske Leksikon, 31. desember 2018. [Internett]. Available: [https://snl.no/elektrisk\\_spenning](https://snl.no/elektrisk_spenning). [Funnet 10. desember 2020].
- [10] Ø. Grøn, «Energi,» Store norske leksikon, 7. august 2020. [Internett]. Available: <https://snl.no/energi>. [Funnet 10. desember 2020].
- [11] H. S. Nygård, *Digitale elektriske kraftsystemer, Kapittel 3 - AC*, Ås: NMBU, 2018.
- [12] F. Høyte, «Effekttrekant,» Store norske leksikon, 31 mars 2020. [Internett]. Available: <https://snl.no/effekttrekant>. [Funnet 11. desember 2020].
- [13] H. S. Nygård, *Forelesning: Digitale elektriske kraftsystemer - transmisjon og distribusjon*, Ås: NMBU, 2018.
- [14] F. Høyte, «Trefase vekselstrøm,» 19. mars 2019. [Internett]. Available: [https://snl.no/trefase\\_-\\_vekselstrøm](https://snl.no/trefase_-_vekselstrøm). [Funnet 11. desember 2020].



- [15] S. Berlijn, Forfatter, *Digitale elektriske kraftsystemer: Kraftsystem, nettplasslegging, utfordringer i Nordiske kraftsystem*. [Performance]. NMBU / Statnett, 2018.
- [16] Statistisk sentralbyrå, «Statistikkbanken: Produksjon og forbruk av energi, energibalanse og energiregnskap,» SSB, [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/statbank/table/11564/tableViewLayout1/>. [Funnet 7. desember 2020].
- [17] D. Spilde, L.E. Hodge, I.H. Magnussen, «Strømforbruk mot 2040 - Analyse av strømforbruk i Fastlands-Norge, Norden og utvalgte EU-land,» Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo, 2019.
- [18] Energifakta Norge, «KRAFTPRODUKSJON,» 3. januar 2019. [Internett]. Available: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/>. [Funnet 7. desember 2020].
- [19] Energifakta Norge, «Kraftmarkedet,» [energifaktanorge.no](http://energifaktanorge.no), 12. oktober 2020. [Internett]. Available: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftmarkedet/>. [Funnet 7. desember 2020].
- [20] Statnett, «Samarbeidsforum TSO/DSO - Arbeidsnotat fra samarbeidsforum,» april 2018. [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/om-statnett/moter-og-arrangementer/samarbeidsforum-tsodso/>. [Funnet 7. desember 2020].
- [21] Norges vassdrags- og energidirektorat, «Reguleringsmyndigheten for energi (RME),» [Internett]. Available: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/>. [Funnet 7. desember 2020].
- [22] K. Sand, «Spenningskvalitet -fenomen for fenomen Definisjoner-årsaker-ulemper-tiltak,» SINTEF, [Internett]. Available: <https://docplayer.me/9443534-Spenningkvalitet-fenomen-for-fenomen-definisjoner-arsaker-ulemper-tiltak.html>. [Funnet 7. desember 2020].
- [23] «Leveringskvalitetsforskriften (2004),» [Internett]. Available: <https://lovdata.no/forskrift/2004-11-30-1557>.
- [24] Norges vassdrags- og energidirektorat, «KILE – kvalitetsjusterte inntektsrammer ved ikke-levert energi,» 20. mars 2009. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/okonomisk-regulering-av-nettselskap/om-den-okonomiske-reguleringen/kile-kvalitetsjusterte-inntektsrammer-ved-ikke-levert-energi/>. [Funnet 7. desember 2020].
- [25] Energifakta Norge, «Forsyningssikkerhet,» 8. april 2019. [Internett]. Available: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/forsyningssikkerhet/>. [Funnet 11. desember 2020].

- [26] National Renewable Energy Laboratory (NREL), «Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin,» 28. mai 2020. [Internett]. Available: <https://www.nrel.gov/news/program/2020/inertia-and-the-power-grid-a-guide-without-the-spin.html>. [Funnet 11. desember 2020].
- [27] Next Kraftwerke, «What is a balancing group?,» [Internett]. Available: <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/balancing-group>. [Funnet 11. desember 2020].
- [28] Energifakta Norge, «Balansemarkedet,» [Internett]. Available: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftmarkedet/balansemarked/>. [Funnet 11. desember 2020].
- [29] Statnett, «Primærreserver - FCR,» 18. november 2018. [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/primarreserver/>. [Funnet 11. desember 2020].
- [30] Statnett, «aFRR - sekundærreserve,» 10. desember 2018. [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/sekundarreserver/>. [Funnet 11. desember 2020].
- [31] Statnett, «Tertiærreserver - mFRR,» 31. oktober 2018. [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/tertiarreserver/>. [Funnet 11. desember 2020].
- [32] Energi Norge, «Drift og utvikling av kraftnettet,» Oslo, 2018.
- [33] Ren 21, «RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT,» REN21 Secretariat, Paris, 2020.
- [34] Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), «Plusskunder,» 22. 10. 2015. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/nettjenester/nettleie/tariffer-for-produksjon/plusskunder/>. [Funnet 29. 11. 2020].
- [35] Multiconsult, «Assessment of the Norwegian Solar PV Market in,» 2020.
- [36] Ingvild Vestre Sem m.fl., «Langsiktig kraftmarkedsanalyse 2020-2040,» Norges Vassdrags- og energidirektorat, Oslo, 2020.
- [37] Energi21, Digital 21, «Digitalisering av energisektoren, Et mulighetsrom,» Energi21, Lysaker, Norge, 2020.
- [38] R. Vinifa m.fl., «Control of power in the grid integrated solar photovoltaic system using linear quadratic regulator,» *Materials Today: Proceedings*, 2020.

- [39] NMBU, *Manual til laboratorieøvelse Solceller*, 2014.
- [40] A. Smets et al., *Solar Energy, The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*, Cambridge, England: UIT Cambridge Ltd, 2016.
- [41] G.B. Gharehpetian, S. Mohammad, Mousavi Agah, *Distributed Generation Systems - Design, Operation and Grid Integration*, Elsevier, 2017.
- [42] M. Hanif, M. Basu, K. Gaughan, «Understanding the operation of a Z-source inverter for photovoltaic application with a design example,» *IET Power Electronics Vol 4. Iss. 3*, pp. 278-287, 2011.
- [43] R. Belur, «What is a smart solar inverter?,» *Solar Power World*, 10. januar 2014. [Internett]. Available: <https://www.solarpowerworldonline.com/2014/01/smart-solar-inverter/>. [Funnet 12. desember 2020].
- [44] A. v. Meier, *Electric Power Systems - a conceptual introduction*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2006.
- [45] S.K. Jain, P. Agrawal, H.O. Gupta, «Fuzzy logic controlled shunt active power filter for power quality improvement,» *IEE Proceedings - Electronic Power Application Vol 149*, pp. 317-328, 5. september 2002.
- [46] Hamdi Abdi, Behnam Mohammadi-ivatloo, Saeid Javadi, Amir Reza Khodaei, Ehsan Dehnavi, «Chapter 7 - Energy Storage Systems,» i *Distributed Generation Systems*, Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 333-368.
- [47] K. A. Rosvold, «Superkondensator,» *Store norske leksikon*, 13. september 2019. [Internett]. Available: <https://snl.no/superkondensator>. [Funnet 11. desember 2020].
- [48] Office of energy efficiency & renewable energy, «Fuel Cells,» [Internett]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>. [Funnet 11. desember 2020].
- [49] B. J. Baliga, «Chapter 16 - IGBT Applications: Power Transmission,» i *The IGBT Device*, William Andrew Publishing, 2015, pp. 539-560.
- [50] Abhinav Kumar Singh, Bikash C. Pal, «Flexible AC transmission system (FACTS),» i *Dynamic Estimation and Control of Power Systems*, Academic Press, 2019.
- [51] Mohammad A.S. Masoum, Ewald F. Fuchs, «Chapter 9 - The Roles of Filters in Power Systems and Unified Power Quality Conditioners,» i *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines (Second Edition)*, Academic Press, 2015, pp. 779-886.
- [52] Abdul Motin Howlader, Staci Sadoyama, Leon R. Roose, Saeed Sepasi,, «Distributed voltage regulation using Volt-Var controls of a smart PV inverter in a smart grid: An experimental study,» *Renewable Energy, Volume 127*, pp. 145-157, 2018.

- [53] Atallah Ouai, Lakhdar Mokrani, Mohamed Machmoum, Azeddine Houari, «Control and energy management of a large scale grid-connected PV system for power quality improvement,» *Solar Energy, Volume 171*, pp. 893-906, 2018.
- [54] Ahmad Khan, Adel Gastli, Lazhar Ben-Brahim, «Modeling and control for new LLCL filter based grid-tied PV inverters with active power decoupling and active resonance damping capabilities,» *Electric Power Systems Research Vol 155*, pp. 307-319, februar 2018.
- [55] K. U. Nguyen Gia Minh Thao, «A two-level control strategy with fuzzy logic for large-scale photovoltaic farms to support grid frequency regulation,» *Control Engineering Practice Vol. 59*, pp. 77-99, 2017.
- [56] Lingguo Kong, Jiamin Yu, Guowei Cai, «Modeling, control and simulation of a photovoltaic /hydrogen/ supercapacitor hybrid power generation system for grid-connected applications,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, nr. 44 , p. 25129, 2019.
- [57] Xiaoyang Chen, Yang Du, Enggee Lim, Huiqing Wen, Lin Jiang, «Sensor network based PV power nowcasting with spatio-temporal preselection for grid-friendly control,» *Applied Energy*, 2019.
- [58] Yun Seng Lim, Jianhui Wong, Miao San Serena Liew, Lin Yi Ace Khaw,, «Proportional integrator (PI) and fuzzy-controlled energy storage for zero-power flow between grid and local network with photovoltaic system,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020.
- [59] IRENA, «Renewable Energy Statistics 2020,» The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.

## VEDLEGG A: ARTIKLER I LITTERATURSØKET

Forfatter(e)	Tittel	År	Land	Institusjon	Problem(er)	Løsning, hovedkategori
M. Kolhe, M. Rasul	3-Phase grid-connected building integrated photovoltaic system with reactive power control capability	2020	Norge	Universitet	Spenningsforstyrrelser, Reaktiv effekt, Effektfaktor	Inverter
R. Sedaghati, M. Shakarami	A novel control strategy and power management of hybrid PV/FC/SC/battery renewable power system-based grid-connected microgrid	2019	Iran	Universitet	Spenningskontroll	Energilagring
K. Kow, Y. Wong, R. Rajkumar	A review on performance of artificial intelligence and conventional method in mitigating PV grid-tied related power quality events	2016	Malaysia	Universitet	Effektkvalitet generelt	Diverse
B. Guo et al.	A Robust Second-Order Sliding Mode Control for Single-Phase Photovoltaic Grid-Connected Voltage Source Inverter	2019	Kina	Universitet	Effektkvalitet generelt, Spenningsforstyrrelser	Inverter
N. Thao, K. Uchida	A two-level control strategy with fuzzy logic for large-scale photovoltaic farms to support grid frequency regulation	2017	Japan	Universitet	Frekvensvariasjoner	Energilagring
S. Tuo, D. Jiandong, X. Ma	Active and reactive power coordination control strategy of overvoltage for distributed PV integrated grid	2019	Kina	Universitet	Effektkvalitet generelt, Spenningskontroll, Reaktiv effekt	Inverter
T. Roy, M. Mahmud	Active power control of three-phase grid-connected solar PV systems using a robust nonlinear adaptive backstepping approach	2017	Australia	Universitet	Harmoniske forstyrrelser	Inverter
A. Howlader, S. Sadoyama, L. Roose, Y. Chen *	Active power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart PV inverters	2020	USA	Universitet	Spenningsforstyrrelser, Frekvensvariasjoner	Inverter *
W. Tareen, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, B. Horan	Active power filter (APF) for mitigation of power quality issues in grid integration of wind and photovoltaic energy conversion system	2017	Malaysia, Australia	Universitet	Effektkvalitet generelt, Harmoniske forstyrrelser	Filter

## Litteratursøk: Oversikt artikler

D. Yang, X. Wang, F. Liu, K. Xin, Y. Liu, F. Blaabjerg	Adaptive Reactive Power Control of PV Power Plants for Improved Power Transfer Capability Under Ultra-Weak Grid Conditions	2019	Danmark, Kina	Universitet, Forskningsinstitutt	Effektfaktor, Reaktiv effekt	Inverter
B. Malakondareddy, S. Senthil Kumar, N. Ammasai Gounden, I. Anand	An adaptive PI control scheme to balance the neutral-point voltage in a solar PV fed grid connected neutral point clamped inverter	2019	India	Universitet	Spenningskontroll, Harmoniske forstyrrelser	Inverter
B. Rahmani, W. Li, G. Liu	An Advanced Universal Power Quality Conditioning System and MPPT method for grid integration of photovoltaic systems	2015	Kina	Universitet	Effektkalivtet generelt, Harmoniske forstyrrelser	Filter
T. Kato, Y. Kimpara, Y. Tamakoshi, M. Kurimoto, T. Funabashi, S. Sugimoto	An Experimental Study on Dual P-f Droop Control of Photovoltaic Power Generation for Supporting Grid Frequency Regulation	2018	Japan	Universitet, Nettoperatør	Spenningsforstyrrelser	Inverter
A. Kharrazi, V. Sreeram, Y. Mishra	Assessment techniques of the impact of grid-tied rooftop photovoltaic generation on the power quality of low voltage distribution network - A review	2020	Australia	Universitet	Harmoniske forstyrrelser, Spenningsforstyrrelser	Diverse
A. El Fadili, F. Cuny, A. El Magri, M. Stitou, F. Giri, J. Janik, F. Chaoui	Backstepping Control of Photovoltaic-Grid Hybrid Power Feed Water Pump	2017	Marokko, Frankrike	Universitet	Spenningskontroll, Effektfaktor	Inverter
Y. Wang, B. Ren, Q. Zhong	Bounded-voltage Power Flow Control for Grid-tied PV Systems	2017	USA	Universitet	Effektkvalitet generelt	Inverter
A. Ouai, L. Mokrani, M. Machmoum, A. Houari	Control and energy management of a large scale grid-connected PV system for power quality improvement	2018	Algerie, Frankrike	Universitet	Effektkvalitet generelt, Harmoniske forstyrrelser, Reaktiv effekt	Inverter
N. Guerrero-Rodríguez, A. Rey-Boué, L. Herrero-de Lucas, F. Martinez-Rodrigo	Control and synchronization algorithms for a grid-connected photovoltaic system under harmonic distortions, frequency variations and unbalances	2015	Spania	Universitet	Spenningsforstyrrelser, Effektfaktor, Harmoniske forstyrrelser, Frekvensvariasjoner	Inverter
R. Vinifa, A. Kavitha, A. Selwynraj	Control of power in the grid integrated solar photovoltaic system using linear quadratic regulator	2020	India	Universitet	Effektkvalitet generelt, Effektfaktor, Harmoniske forstyrrelser, Reaktiv effekt	Inverter
B. Fekkak, M. Mena, B. Boussahoua	Control of transformerless grid-connected PV system using average models of power electronics converters with MATLAB/Simulink	2018	Algerie	Universitet	Spenningskontroll, Effektfaktor	Inverter

Litteratursøk: Oversikt artikler

M. Salem, Y. Atia	Control scheme towards enhancing power quality and operational efficiency of single-phase two-stage grid-connected photovoltaic systems	2015	Egypt	Universitet	Spenningsforstyrrelser, Harmoniske forstyrrelser	Inverter
M. Hagh, M. Jadidbonab, M. Jedari	Control strategy for reactive power and harmonic compensation of three-phase grid-connected photovoltaic system	2017	Iran	Universitet	Harmoniske forstyrrelser, Reaktiv effekt	Inverter
M. Lakshmi, S. Hemamalini	Coordinated control of MPPT and voltage regulation using single-stage high gain DC–DC converter in a grid-connected PV system	2019	India	Universitet	Harmoniske forstyrrelser, Reaktiv effekt, Spenningskontroll	Inverter
H. Sasahara, T.i Ishizaki, T. Sadamoto, T. Masuta, Y. Ueda, H. Sugihara, N. Yamaguchi, J. Imura	Damping performance improvement for PV-integrated power grids via retrofit control	2019	Japan	Universitet	Effektkvalitet generelt	Diverse
R. Tripathi, A. Singh, T. Hanamoto	Design and control of LCL filter interfaced grid connected solar photovoltaic (SPV) system using power balance theory	2015	Japan, India	Universitet	Reaktiv effekt, Effektfaktor	Filter
A. Howlader, S. Sadoyama, L. Roose, S. Sepasi *	Distributed voltage regulation using Volt-Var controls of a smart PV inverter in a smart grid: An experimental study	2018	USA	Universitet	Spenningskontroll, Reaktiv effekt	Inverter *
O. Unigwe, D. Okekunle, A. Kiprakis	Economical distributed voltage control in low-voltage grids with high penetration of photovoltaic	2017	Storbritannia	Universitet	Spenningsforstyrrelser	Energilagring
I. Kim, R. Harley	Examination of the effect of the reactive power control of photovoltaic systems on electric power grids and the development of a voltage-regulation method that considers feeder impedance sensitivity	2020	Sør-Korea, USA, Sør-Afrika	Universitet	Spenningskontroll, Reaktiv effekt	Inverter
S. Ouchen, S. Abdeddaim, A. Betka, A. Menadi **	Experimental validation of sliding mode-predictive direct power control of a grid connected photovoltaic system, feeding a nonlinear load	2016	Algerie	Universitet	Harmoniske forstyrrelser, Effektfaktor	Filter **
S. Ouchen, A. Betka, S. Abdeddaim, A. Menadi **	Fuzzy-predictive direct power control implementation of a grid connected photovoltaic system, associated with an active power filter	2016	Algerie	Universitet	Harmoniske forstyrrelser, Spenningskurve	Filter **

## Litteratursøk: Oversikt artikler

K. Sarker, D. Chatterjee, S. Goswami	Grid integration of photovoltaic and wind based hybrid distributed generation system with low harmonic injection and power quality improvement using biogeography-based optimization	2017	India	Universitet	Effektkvalitet generelt, Spenningsforstyrrelser, Reaktiv effekt, Harmoniske forstyrrelser	Inverter
Q. Peng, A. Sangwongwanich, Y. Yang, F. Blaabjerg	Grid-friendly power control for smart photovoltaic systems	2020	Danmark	Universitet	Spenningskontroll, Frekvensvariasjoner	Inverter
M. Masaki, L. Zhang, X. Xia	Hierarchical Power Flow Control of a Grid-tied Photovoltaic Plant Using a Battery-Supercapacitor Energy Storage System	2018	Sør-Afrika	Universitet	Spenningskontroll	Energilagring
P. Chaudhary, M. Rizwan	Hybrid control approach for PV/FC fed voltage source converter tied to grid	2018	India	Universitet	Spenningsforstyrrelser, Effektfaktor, Harmoniske forstyrrelser, Reaktiv effekt	Inverter
N. Brinkel, M. Gerritsma, T. AlSkaif, I. Lampropoulos, A. van Voorden, H. Fidler, W. van Sark	Impact of rapid PV fluctuations on power quality in the low-voltage grid and mitigation strategies using electric vehicles	2020	Nederland	Universitet, Nettoperatør	Spenningsforstyrrelser	Energilagring
A. Tavakoli, S. Saha, M. T. Arif, M. E. Haque, N. Mendis, A. M. T. Oo	Impacts of grid integration of solar PV and electric vehicle on grid stability, power quality and energy economics: a review	2020	Australia	Universitet, Teknologiselskap	Effektkvalitet generelt, Spenningsforstyrrelser	Energilagring
L. Leite, W. Boaventura, L. Errico, E. Cardoso, R. Dutra, B. Lopes	Integrated voltage regulation in distribution grids with photovoltaic distribution generation assisted by telecommunication infrastructure	2016	Brasil	Universitet, Nettoperatør	Spenningskontroll, Reaktiv effekt	Energilagring
A. Khan, A. Gastli, L. Ben-Brahim	Modeling and control for new LLCL filter based grid-tied PV inverters with active power decoupling and active resonance damping capabilities	2018	Qatar	Universitet	Harmoniske forstyrrelser, Spenningskurve	Filter
L. Kong, J. Yu, G. Cai	Modeling, control and simulation of a photovoltaic /hydrogen/ supercapacitor hybrid power generation system for grid-connected applications	2019	Kina	Universitet	Effektkvalitet generelt	Energilagring
F. Zhang, A. Fu, L. Ding, Q. Wu	MPC based control strategy for battery energy storage station in a grid with high photovoltaic power penetration	2020	Kina, Danmark	Universitet	Effektkvalitet generelt	Energilagring



## Litteratursøk: Oversikt artikler

M. Aourir, A. Abouloifa, I. Lachkar, A. Hamdoun, F. Giri, F. Cuny	Nonlinear Control of PV System Connected to Single Phase Grid through Half Bridge Power Inverter	2017	Marokko, Frankrike	Universitet	Effektkvalitet generelt, Effektfaktor, Harmoniske	Inverter
G. Yan, S. Liang, Q. Jia, Y. Cai ***	Novel adapted de-loading control strategy for PV generation participating in grid frequency regulation	2019	Kina	Universitet	Spenningskontroll, Frekvensvariasjoner	Inverter ***
S. Patra, N. Kishor, S. Mohanty, P. Ray	Power quality assessment in 3- $\Phi$ grid connected PV system with single and dual stage circuits	2016	India	Universitet	Effektkvalitet generelt, Spenningskurve	Inverter
I. Syed, K. Raahemifar	Predictive energy management and control system for PV system connected to power electric grid with periodic load shedding	2016	Canada	Universitet	Effektkvalitet generelt	Energilagring
Y. Lim, J. Wong, M. Liew, L. Khaw	Proportional integrator (PI) and fuzzy-controlled energy storage for zero-power flow between grid and local network with photovoltaic system	2020	Malaysia	Universitet	Effektkvalitet generelt	Energilagring
Z. Li, Y. Peng, F. Yao, M. Liu	Research on the strategy of cooperative control between photovoltaic grid-connected and reactive power compensation technology	2019	Kina	Universitet	Harmoniske forstyrrelser, Spenningsforstyrrelser, Reaktiv effekt	Inverter
M. Mirhosseini	Sensitivity analysis, adaptability improvement and control of grid-connected photovoltaic power plants under grid frequency variations	2019	Iran	Universitet	Frekvensvariasjoner, Harmoniske forstyrrelser, Spenningsforstyrrelser	Filter
X. Chen, Y. Du, E. Lim, H. Wen, L. Jiang	Sensor network based PV power nowcasting with spatio-temporal preselection for grid-friendly control	2019	Kina, Australia, Storbritannia	Universitet	Effektkvalitet generelt	Diverse
I. Abadlia, M. Adjabi, H. Bouzeria	Sliding mode based power control of grid-connected photovoltaic-hydrogen hybrid system	2017	Algerie	Universitet	Effektfaktor	Energilagring
H. Özbay, S. Öncü, M. Kesler	SMC-DPC based active and reactive power control of grid-tied three phase inverter for PV systems	2017	Tyrkia	Universitet	Harmoniske forstyrrelser, Reaktiv effekt	Inverter
G. Yan, Y. Cai, Q. Jia, S. Liang ***	Stability analysis of grid-connected PV generation with an adapted reactive power control strategy	2019	Kina	Universitet	Spenningskontroll, Reaktiv effekt	Inverter ***

## Litteratursøk: Oversikt artikler

R. Senapati, V. Illa, S. Swain	Voltage and current profile improvement of a PV-integrated grid system employing sinusoidal current control strategy based unified power quality conditioner	2020	India	Universitet, Myndigheter	Harmoniske forstyrrelser, Reaktiv effekt, Spenningskontroll, Spenningskurve	Filter
X. Tong, M. Zhong, X. Zhang, J. Deng, Z. Zhang	Voltage regulation strategy of AC distribution network based on distributed PV grid-connected inverter	2019	Kina	Universitet, Forskningsinstitutt	Spenningskontroll, Reaktiv effekt	Inverter
M. Theißen, K. Schaab, O. Stursberg	Voltage Stability of Power Grids with PV Plants using Robust LPV-Control	2016	Tyskland	Universitet	Spenningsforstyrrelser	Filter
M. Talha, S. Raihan, N. Rahim	PV inverter with decoupled active and reactive power control to mitigate grid faults	2020	Malaysia	Universitet	Effektkvalitet generelt	Energilagring
B. Yang, X. Wang, D. Xie, Y. Guo	Novel control strategy of grid-connected photovoltaic power supply for frequency regulation	2019	Kina	Universitet	Frekvensvariasjoner	Filter

- \* Samme forfattere (A. Howlader, S. Sadoyama, L. Roose, Y. Chen), og de to artiklene omfatter samme type løsning, men ulike typer PV-anlegg
  - Active power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart PV inverters
  - Distributed voltage regulation using Volt-Var controls of a smart PV inverter in a smart grid: An experimental study
- \*\* Samme forfattere (S. Ouchen, A. Betka, S. Abdeddaim, A. Menadi), og de to artiklene omfatter samme type løsning
  - Experimental validation of sliding mode-predictive direct power control of a grid connected photovoltaic system, feeding a nonlinear load
  - Fuzzy- predictive direct power control implementation of a grid connected photovoltaic system, associated with an active power filter
- \*\*\* Samme forfattere (G. Yan, Y. Cai, Q. Jia, S. Liang), og de to artiklene omfatter samme type løsning
  - Novel adapted de-loading control strategy for PV generation participating in grid frequency regulation
  - Stability analysis of grid-connected PV generation with an adapted reactive power control strat





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

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway