

Elkvalitet kopplad till fördelningsstationer

**En studie om förnybara energikällors
påverkan på mellanspänningsnätet**



Nora Lindgren

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

Elkvalitet kopplad till fördelningsstationer

En studie om förnybara energikällors påverkan på
mellanspänningsnätet



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

**LTH vid Campus Helsingborg
Industriell Elektroteknik och Automation**

Examensarbete:

Nora Lindgren

© Copyright Nora Lindgren

LTH vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH at Campus Helsingborg
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Lunds universitet
Lund 2025

Sammanfattning

Integrationen av variabel elproduktion, såsom sol- och vindkraft, i elnätet bli allt vanligare. Det leder till utmaningar i form av spänningsvariationer, försämrad stabilitet och lägre elkvalitet. En möjlig lösning är energilagring, som kan stödja elnätet genom tjänster som peak-shaving och frekvensreglering, vilket bidrar till stabilisering och effektivare energianvändning.

Begreppet elkvalitet omfattar olika kriterier för en störningsfri leverans av el. Vanliga störningskällor är övertoner, flimmer, transienter och spänningsvariationer. Fördelningsstationer, som tar emot högspänning från transmissionsnätet och omvandlar den till lägre spänning för lokal distribution, är centrala för elkvaliteten.

Detta examensarbete undersöker vilka av de fyra elkvalitetsparametrarna som påverkas vid fördelningsstationer, samt vilka faktorer – såsom producerad effekt, avstånd och belastning – som har störst inverkan. Arbetet har genomförts på Lunds Tekniska Högskola i samarbete med Sweco.

Utförande av arbetet har bestått av litteraturstudier, intervjuer och simuleringar i programmet DIg SILENT PowerFactory. En modell av ett mellanspänningsnät byggdes i simuleringsprogrammet där olika parametrars påverkan på elkvaliteten kunde undersökas.

Resultaten visar att övertoner och spänningsvariationer påverkar elkvaliteten vid fördelningsstationer i takt med ökad produktion från solceller. Däremot påverkas inte transienter och flimmer av solcellsproduktion, utan uppstår främst från andra störkällor. Analysen visar att den producerade effekten från solceller har störst påverkan på spänningsvariationer, medan avståndet mellan solceller och stationen har större betydelse för övertonsnivåerna. Dessutom visar resultaten att andelen anslutna laster påverkar både spänningsvariationer och förekomsten av övertoner, vilket ytterligare understryker vikten av en balanserad elförbrukning i elnätet.

Nyckelord

Elkvalitet, elnät, fördelningsstationer, variabel elproduktion, solceller.

Abstract

The integration of renewable energy sources such as solar and wind power is steadily increasing, which introduces challenges such as voltage fluctuations, reduced system stability, and lower power quality. Battery Energy Storage Systems (BESS) can support the grid by providing services such as frequency regulation and peak shaving, contributing to a more stable and energy-efficient power system.

Power quality refers to a range of criteria that ensure the reliable and disturbance-free delivery of electricity. Common sources of disturbances include harmonics, flicker, transients, and voltage variations. Substations, which receive high-voltage electricity from the transmission network and step it down for distribution to local networks, play a key role in maintaining power quality.

This thesis investigates which of the four power quality parameters are affected at substations, as well as which factors – such as power output, distance, and load – have the greatest influence. The project was conducted at Lund University of Technology in collaboration with Sweco.

The methodology included literature reviews, interviews, and simulations in DIgSILENT PowerFactory. A model of a medium-voltage grid was built in the simulation environment to analyze how various parameters affect power quality.

The results show that harmonics and voltage variations impact power quality at substations as solar power production increases. In contrast, transients and flicker are not caused by solar generation but arise primarily from other sources. The analysis indicates that the amount of power produced by solar cells has the greatest influence on voltage variations, while the distance between the solar installation and the substation has a more significant effect on harmonic levels. Additionally, the proportion of connected loads influences both voltage variations and the occurrence of harmonics, highlighting the importance of maintaining balanced electricity consumption within the grid.

Keywords

Power quality, power grid, substations, renewable energy, solar cells.

Förord

Detta är ett examensarbete på 22,5 hp som är det sista momentet på min utbildning, högskoleingenjör i elektroteknik med automation. Det har varit tre svåra och lärorika år, där jag har lärt känna vänner och livet.

Jag vill tacka min handledare Samuel Estenlund på Lunds Universitet för all hjälp och stöttning med bra idéer till arbetet, som jag inte hade kunnat komma på själv.

Jag vill även tacka mina handledare Moa Rönnlund och Måns Rosberg på Sweco för allt stöd och bra återkoppling. De har fått mig att känna mig som en del av deras team.

Mina föräldrar och sambo har stöttat mig mycket under utbildningen, de förtjänar också ett stort tack.

Terminologi

AC	Alternating current	Växelström
AIS	Air Insulated Switchgear	Luftisolerade ställverk
BESS	Battery Energy Storage System	Batterienergilagringssystem
DC	Direct current	Likström
EMC	Electromagnetic compatibility	Elektromagnetisk kompatibilitet
GIS	Gas Insulated Switchgear	Gasisolerade ställverk
kV	Kilovolts	Kilovolt
MW	Megawatts	Megawatt
P	Active power	Aktiv effekt
PV	Photovoltaic	Fotovoltaisk
R	Resistance	Resistans
S	Apparent power	Skenbar effekt
SF ₆	Sulfur hexafluoride	Svavelhexafluorid
HD	Harmonic Distortion	Övertonshalt
THD	Total Harmonic Distortion	Total övertonshalt
Z	Impedance	Impedans

Innehållsförteckning

1. Introduktion.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål	1
1.3 Frågeställning	2
1.4 Motivering.....	2
1.5 Avgränsningar	2
2. Teori	3
2.1 Sveriges elnät	3
2.2 Elkvalitet.....	6
2.2.1 Vem ansvarar för god elkvalitet?	6
2.2.2 Vilka är konsekvenserna av dålig elkvalitet?	7
2.2.3 Hur kan elkvaliteten förbättras?.....	8
2.3 Elkvalitetsparametrar	9
2.3.1 Spänningsvariationer	10
2.3.2 Spänningsvariationer i olika delar av elnätet	11
2.3.4 Övertoner.....	13
2.3.5 Transienter	14
2.3.3 Flimmer	14
2.4 Fördelningsstationer	15
2.4.1 Typer.....	15
2.4.2 Brytare	15
2.4.3 Frånskiljare	16
2.4.4 Reläskydd	16
2.4.5 Transformatorer.....	16
2.4.6 Lindningskopplare	18
2.5 Solceller	20
2.6 Energilagring	22
3. Metod.....	24
3.1 Litteraturstudie	24
3.2 Intervju	24
3.2.1 Öresundskraft	24
3.2.2 dLab	24
3.2.4 E.ON.....	25
3.2.5 Halmstads Energi	25
3.3 Simulering	25
3.3.1 Spänningsvariationer	25
3.3.2 Övertoner.....	26
3.3.3 Modell	26
3.4 Studiebesök.....	27

4. Analys	28
4.1 Spänningsvariationer.....	28
4.1.1 Variationer över transformatorn.....	30
4.1.2 Variationer sommar och vinter	31
4.2 Övertoner	32
4.3 Transienter.....	33
4.4 Flimmer	33
5. Resultat.....	34
5.1 Scenario 1	34
5.2 Scenario 2	39
5.3 Scenario 3	42
5.4 Sammanställning av resultat.....	44
6. Diskussion.....	46
7. Slutsats	49
8. Framtida studier	50
9. Referenser.....	51
10. Appendix	54

1. Introduktion

Andelen förnybara energikällor ökar ständigt i elnätet, vilket ställer krav för att hålla elkvaliteten på en god nivå. Fördelningsstationer är en del i elnätet som matar högspänningsledningar i lokalnätet från regionnätet. De har en stor betydelse för att säkerställa hög elkvalitet i elnätet [1].

1.1 Bakgrund

Elkvalitet innebär att elkonsumenten har tillgång till störningsfri leverans av el, alltså att elanvändaren kan använda elen utan störningar eller avbrott [2]. Det är viktigt för industrier eftersom dålig elkvalitet kan orsaka skador på anläggningar. Elkvalitet omfattar parametrar som spänning och frekvens, dessa parametrar måste hållas inom tillåtna gränser för att elnätet ska fungera effektivt och tillförlitligt [3]. Förnybar energi från källor som är väderberoende, till exempel vind- och solkraft, kallas för variabla energikällor. På grund av väderberoendet kommer elproduktionen att variera, vilket leder till spänningsvariationer, försämrad stabilitet och lägre elkvalitet. I takt med att andelen förnybara energikällor blivit vanligare, ökar störningar i nätet [4]. Möjliga lösningar på detta kan vara att använda filter, energilagringssystem och automatisk styrning för att stabilisera spänning och frekvens samt reducera harmoniska störningar. Dessa lösningar kan implementeras i fördelningsstationer för att skapa ett flexiblere nät [5].

1.2 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att genom insamlad data om fördelningsstationer, simulera och jämföra påverkan variabla energikällor har på elkvaliteten.

Simuleringarna görs med hjälp av DIg SILENT PowerFactory. Resultatet kan användas som riktlinje för framtida installationer av solparker, för att på så sätt veta vilka faktorer som påverkar elkvaliteten hos närliggande fördelningsstationer. [5].

Examensarbetet genomförs i samarbete med Sweco, som är verksamma inom elkraft, arbetet görs på avledningen Substations i Malmö.

1.3 Frågeställning

Frågeställningarna som examensarbetet kommer besvara:

1. Vilka typer av elkvalitetbrister: övertoner, spänningsvariationer, transienter eller flimmer är ett problem vid fördelningsstationer?
2. Hur påverkar integrationen av förnybara energikällor elkvaliteten i fördelningsstationer?
3. Hur kan energilagringssystem bidra till att stabilisera spänning i elnätet?

1.4 Motivering

Ämnet till examensarbetet valdes då förnybara energikällor är ett intresse som vuxit fram under studierna. Intresset började i kursen Elenergiteknik, där det presenterades om solceller och batterilagring. Det gjordes en förstudie, hos Sweco, till examensarbetet gällande batterilagring, hållbarhet, återvinning och framtida behov inom förnybar energi. Efter förstudien diskuterades det fram att examensarbetet skulle handla om elkvalitet kopplad till fördelningsstationer.

Sweco ser fördelar med detta examensarbete eftersom fördelningsstationer har en central roll i att upprätthålla elkvaliteten i elnätet. I deras motivering till examensarbetet nämner de att: ”Genom att upprätthålla god elkvalitet i fördelningsstationer kan man säkerställa att elnätet fungerar effektivt och pålitligt, vilket gynnar både leverantörer och konsumenter” [5].

1.5 Avgränsningar

Examensarbetet innefattar hur elkvaliteten påverkar fördelningsstationer för ett 130/10 kV nät, detta har utförts med stöd av litteraturstudier, intervjuer med elnätsägare/företag och simuleringar. Den förnybara energikällan som undersöks i detta arbete kommer vara solcellsproduktion.

2. Teori

I detta avsnitt presenteras teknisk information om elkvalitetens regler och krav enligt standarder. Fördelningsstationens syfte och komponenter diskuteras även.

2.1 Sveriges elnät

Sveriges elnät består av transmissionsnät och distributionsnät. Elnätsföretagen har ensamrätt på elnätet, för att få äga och driva elnät krävs särskilda tillstånd.

Distributionsnätet består i sin tur av regionnät och lokalnät, se figur 2.1 [6].

Transmissionsnät (stamnät): 220-400 kV. Transporterar mycket el från de stora elproducenterna till distributionsnäten. Det går genom hela Sverige och kopplas även ihop med andra länders elnät. Transmissionsnätet överför elen från norr till söder och kan jämföras med motorvägar. Detta nät använder hög spänning, eftersom strömförlusterna då minskas. Svenska Kraftnät ansvarar för drift och övervakning [7].

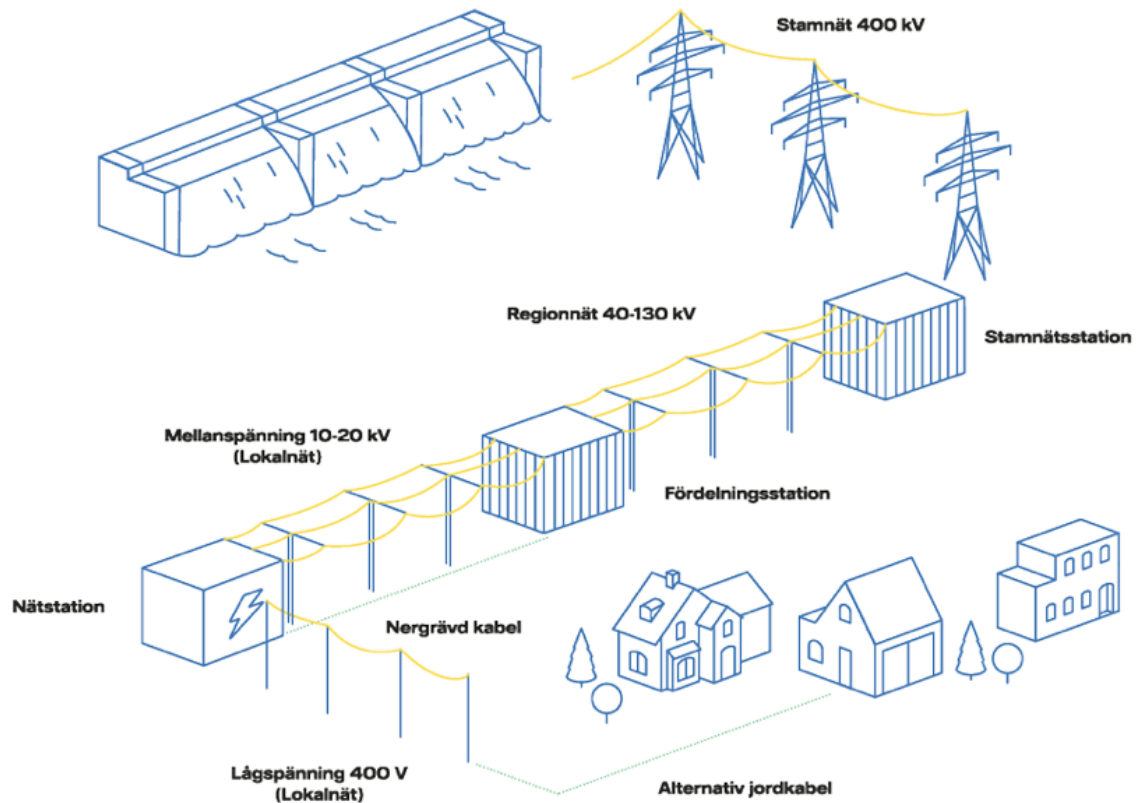
Distributionsnät: Används för att vidare distribuera el från transmissionsnätet.

Distributionsnätet delas in i:

- **Regionnät:** 130 kV. Ansluts till transmissionsnätet och transporterar vidare elen till lokalnätet, likt landsvägar. Mellanstora elproducenter eller stora elanvändare/elförbrukare är anslutna till regionnätet. Regionnätet ägs av stora elnätsföretag som till exempel Vattenfall och E.ON.
- **Lokalnät:** <40 kV. Transporterar elen den sista biten ut till de flesta elanvändare/elförbrukare som till exempel hushåll. Mindre elproducenter kan var ansluta till lokalnätet, till exempel de som säljer överskottet på sin hushållsproduktion. De lokala näten ägs av över 100 små och stora elnätsföretag, exempelvis Kraftringen och Öresundskraft. Lokalnätet består av så kallade mellanspänningsnät och lågspänningsnät.

Den del av nätet som ska studeras är mellanspänningsnätet, där fördelningsstationerna är placerade. Spänningsvariationer av olika typer är ett av det största problem i våra elnät, de kan delas in i olika grupper. Det första är problem orsakade av feltillstånd i nätet, exempelvis på grund av jordfel eller åsknedslag, det kan aldrig helt byggas bort.

Det andra är problem orsakade av lastkopplingar i elnätet, exempelvis inkoppling av transformatorer eller elmaskiner, det kan ofta undvikas [8]. Det tredje är producerad effekt från variabel elproduktion, som också kan undvikas.



Figur 2.1: Överblick på elnätet [6].

En viktig egenskap i elnätet är hur mycket spänningen påverkas när det belastas. Spänningsfall i elnätet uppstår då det konsumeras en större ström, som ger upphov till ett spänningsfall över en eller flera impedanser i nätet. Lösningen är ett nät med mycket liten kortslutningsimpedans. Då skulle inkopplad last ge upphov till ett mycket litet spänningsfall. En så låg kortslutningsimpedans går dock inte i praktiken, endast i teorin. Det skulle betyda omfattande ombyggnad av elnätet, vilket kostar stora summor pengar. Dessutom skulle en låg kortslutningsimpedans innebära stora kortslutningseffekter, vilket inte är bra ur säkerhetssynpunkt [8].

Kortslutningsimpedansen (Z_k) består av en resistiv (R) och en reaktiv (X) komponent, enligt ekvation 1 nedan.

$$Z_k = R + jX \quad (1)$$

Högt Z_k innebär ett svagt nät, där belastning ger upphov till stora spänningsvariationer. Enligt Ohms lag, ekvation 2.

$$U = Z \cdot I \quad (2)$$

En högre impedans Z innebär en lägre ström. En låg ström ger en låg skenbar effekt (S). Låg Z_k innebär ett starkt nät, vilket ger upphov till mindre spänningsvariationer. Kortslutningseffekten (S_k) är ett mått på hur starkt elnätet är. Det kan beräknas enligt ekvation 3.

$$S_k = \sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k = \frac{U_k^2}{Z_k} \quad (3)$$

Högt S_k innebär ett starkt nät och därmed låg påverkan på spänningen vid lastströmmar. Lågt S_k innebär ett svagt nät och stor påverkan på spänningen vid lastströmmar [9].

På de högre spänningsnivåerna är nätet starkare än på de lägre spänningsnivåerna. Nätet kan belastas mer på de högre spänningsnivåerna utan att det sker några större variationer. Det som avgör hur starkt ett nät är i en viss punkt är serieimpedansen mellan punkten och generatorer. Utrustning som är dimensionerade för höga effekter har låga impedanser, som transformatorer och kraftledningar i transmissions- och distributionsnätet. Vice versa har utrustning dimensionerade för låga effekter högre impedanser [10].

Ett sätt att göra nätet starkare är att öka effekten som transformatorer och ledningar kan hantera. Nackdelen med ett starkt nät är att kortslutningsströmmarna bli större, vilket kräver utrustning som kan ta hand om felströmmar. Det är en avvägning mellan stabil spänning och hanterbara felströmmar som avgör hur starkt ett nät bör vara.

Idag är distributionsnätet utformat för att hantera enkelriktade effektlöden från transmissionsnätet till hushåll och industrier. Ökad integration av förnyelsebara energikällor i distributionsnätet kommer kräva dubbelriktade effektlöden, eftersom elproduktionen lokalt kan överstiga konsumtionen.

2.2 Elkvalitet

Begreppet elkvalitet innefattar olika kriterier för en störningsfri energileverans. Det finns olika störningsorsaker att ta hänsyn till när man pratar om elkvalitet. Vår vanliga miljö kan förorenas av utsläpp, på samma sätt kan elmiljön på elnätet förorenas genom olika typer av störningar. De vanligaste typerna av störningar är övertoner, flimmer, transienter och spänningsvariationer [11]. Krav på spänningsnivåer, övertoner och tillåtna avbrottstider finns i form av standarder. EIFS 2023:3 [16] är en standard framtagna av Energimarknadsinspektionen, den innehåller allmänna råd om krav som ska vara uppfyllda för att överföringen av el ska vara av god elkvalitet.

SS-EN 61 000 är en samling av standarder som innehåller krav avseende elektromagnetisk kompatibilitet (Electromagnetic Compatibility, EMC) [12]. SS-EN 61000-4-30 är en standard i denna serie som handlar om mät- och provningsmetoder för mätning av spänningsgodhet och elkvalitet.

Den europeiska standarden SS-EN 50160 beskriver huvudegenskaperna hos spänningen i elkonsumentens anslutningspunkt i distributionsnätet under normala driftsförhållanden. Standarden innehåller gränser för var spänningen förväntas ligga vid anslutningspunkter i de publika europeiska näten [8].

2.2.1 Vem ansvarar för god elkvalitet?

Det finns tre parter som tillsammans är delaktiga och tar ansvar för elkvaliteten. Det är elnätägaren, apparat/anläggningsleverantörer samt elkonsumenterna. Majoriteten av elkvalitetsproblemen beror på bristande kunskaper hos en eller flera av de tre aktörerna. Elnätägaren anses dock ofta ha ansvar för elkvaliteten i det elnät som ägaren driver. Ett vanligt problem är att elkunden ansluter störande laster till elnätet utan att först meddela elnätsägaren [9]. Även fast man håller sig inom tillåtna gränser enligt standarden kan kunden ändå uppleva störningar, detta leder i så fall till en diskussion mellan kunden och nätägaren [13].

2.2.2 Vilka är konsekvenserna av dålig elkvalitet?

Om det finns en god elkvalitet är en fråga som berör elkonsumenterna. Den bristande elkvaliteten kan orsaka skador hos apparater och i värsta fall leda till avbrott. Avbrott i industrier kan påverka produktionen och leda till ekonomiska förluster. För elnätet innebär avbrott en ineffektiv användning av elektricitet vilket även leder till högre energikostnader. Störningar kan inte helt byggas bort i elnätet, därför ställs det även vissa krav på vad apparaterna måste klara av [8].

Det är viktigt att elkonsumenterna får god elkvalitet, men det är även viktigt att det finns en god elkvalitet i stationerna i elnätet. Denna rapport fokuserar på elkvaliteten i fördelningsstationer. Ökad värmeutveckling på grund av dålig elkvalitet kan öka risken för att komponenter i stationen tar skada. Över- eller underspänning kan påverka transformatorer, vilket kan leda till extra kostnader för reparation [8].

Kondensatorbatterier kan finnas i vissa fördelningsstationer för att hålla spänningsnivån jämn, dessa kan vara känsliga för övertoner. Övertoner kan leda till värmeutveckling i elektronik, däremot ska apparater tåla de normala halterna övertoner som finns i nätet. Lösningen för att skydda komponenter mot övertoner är övertonsfilter. Fördelningsstationer är generellt robusta, det finns inte många aktiva komponenter.

Om en stor och viktig komponent går sönder och det är ett halvårs leveranstid, kan inte kunderna ha ett halvårs avbrott tills att en ny komponent har satts dit. Det finns krav på tider att återställa driften med hjälp av reservlager.

Konsekvenserna till följd av bristande elkvalitet kan påverka både industrier och hushåll. Industrier får stora problem då maskiner kan sluta fungera som de ska. Maskiner kan behöva stängas ner i en viss takt för att inte skada människor runt omkring, därför är det viktigt att det inte sker några plötsliga avbrott när stora maskiner är inblandade. I hushåll kan bristande elkvalitet märkas av i form av att tv:n eller lampor blinkar till. Dessa konsekvenser är varken stora eller farliga, utan kan uppfattas som störande [13].

Inkoppling av ett stort batteri eller en stor värmepump kommer ge upphov till en påverkan på den nätdelen som de är anslutna till. När lasterna sedan startas kommer de ge upphov till en stor startström, som i sin tur leder till att spänningen kommer sjunka, vilket medför en påverkan på elkvaliteten [38].

2.2.3 Hur kan elkvaliteten förbättras?

Det är viktigt att dimensionera apparater på ett korrekt sätt innan de ansluts till elnätet, detta kan göras genom mätningar på den befintliga elkvalitetens olika parametrar. På så sätt vet kunder vad som kan kopplas in till elnätet och inte, för att följa kraven efter vad som anses vara av god elkvalitet [38].

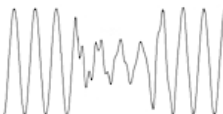
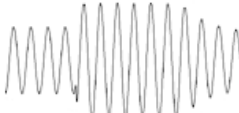
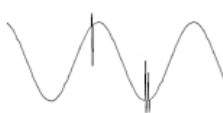
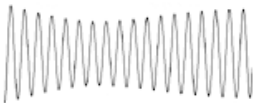
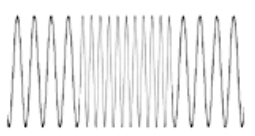
Balansering av nätet innebär att det varje sekund tillförs lika mycket el till kraftsystemet som det förbrukas. Denna balans är en förutsättning för att kraftsystemet ska fungera och leverera el. Störningar i balansen riskerar att skada eller få teknisk utrustning att sluta fungera som det ska [14].

Det integreras mer variabel elproduktion i vårt elnät, vilket kan göra det svårt att hålla elnätet balanserat. Eftersom det inte går att veta exakt när det ska vara soligt eller när det ska blåsa. En lösning till detta kan vara energilagring med batterier. Det är ett sätt att balansera och stabilisera elnätet då ett energilager ger möjlighet till att lagra och snabbt tillföra aktiv effekt. En korrekt balansering av reaktiv och aktiv effekt ger högre elkvalitet och jämn spänningsnivå [4].

2.3 Elkvalitetsparametrar

I detta kapitel beskrivs parametrarna inom elkvalitet, både definition och vilka gränser var och en bör förhålla sig till enligt standarder. I tabell 2.1 visas en sammanfattning på elkvalitetsparametrar med en kort beskrivning om hur de orsakas [15].

Tabell 2.1: Avvikelser från nominell sinusform i nätspänningens kurvform [15].

Elkvalitetsparamter	Sinusform	Orsak
Spänningsdippar		Jordfel, kortslutning, inkoppling av stora laster.
Spänningshöjningar		Dålig jordning, urkoppling av stora laster
Övertoner		Olinjära laster, switchade nätaggregat, frekvensomriktare.
Transienter		In-/urkoppling av kondensatorbatterier, åska.
Flimmer		Svetsar, ljusbågsugnar, värmepumpar, induktionshällar.
Obalans		Större hushållsapparater (tvättmaskin, diskmaskin).
Frekvensavvikelser		Bortkoppling av större kraftgenerering, ex större vattenkraft- eller kärnkraftanläggning.

2.3.1 Spänningsvariationer

Spänningen i elnätet kan inte alltid hållas på exakt samma nivå, därför finns det gränser för hur mycket spänningen får variera och under hur lång tid. Varaktigheten i tid avgör om det ska klassas som en långvarig eller kortvarig variation. Variationen kan klassas som en spänningsökning eller en spänningssänkning, detta avsnitt handlar om raderna spänningsdippar och spänningshöjningar från tabell 2.1.

Långvariga spänningsvariationer avser förändringar i spänningens effektivvärde under en 10 minuters period. Effektivvärdet ska ligga mellan 90% och 110% av den nominella spänningen. Det är inte endast hur mycket spänning ökar eller minskar som ska tas i beaktning när det handlar om god elkvalitet. *Kortvariga spänningsvariationer* avser tillfälliga höjningar i spänningens effektivvärde. *Kortvariga spänningssänkningar* innebär en sänkning av spänningens effektivvärde under 90 procent av referensspänningen, se tabell 2.2. *Kortvariga spänningshöjningar* innebär en tillfällig höjning av spänningens effektivvärde över 110 procent av referensspänningen, se tabell 2.3 Kortvariga spänningsvariationer inom området God kvalitet (grönt) anses som god elkvalitet oavsett antalet spänningsändringar. Det är inte god elkvalitet om det förekommer kortvariga spänningsvariationer inom området Inte god kvalitet (rött) [16].

Tabell 2.2: Gränser för kortvariga spänningssänkningar upp till och med 45 kV [16].

Spänning U [%]	Varaktighet, t [ms]						
	$10 \leq t \leq 200$	$200 \leq t \leq 500$	$500 \leq t \leq 1000$	$1000 \leq t \leq 5000$	$5000 \leq t \leq 60000$	$60000 < t$	
$80 \leq U < 90$	God elkvalitet						Inte god elkvalitet
$70 \leq U < 80$							
$40 \leq U < 70$							
$5 \leq U < 40$							
$U < 5$							

Tabell 2.3: Gränser för kortvariga spänningshöjningar upp till och med 45 kV [16].

Spänning U [%]	Varaktighet, t [ms]			
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$	$60000 < t$
$135 \leq U$	Inte god elkvalitet			
$115 \leq U < 135$				
$111 \leq U < 115$				
$110 \leq U < 111$				

Snabba spänningsändringar uppstår när spänningens effektivvärde förändras snabbare än 0,5 % per sekund, samtidigt som spänningens effektivvärde är mellan 90% och 110% av den nominella spänningen. Snabba spänningsändringar bestäms av stationär och maximal spänningsändring. $\Delta U_{\text{stationär}}$ är skillnaden mellan spänningens effektivvärde före och efter ändringen. ΔU_{max} är den maximala spänningsändringen under ett spänningsändringsförlopp.

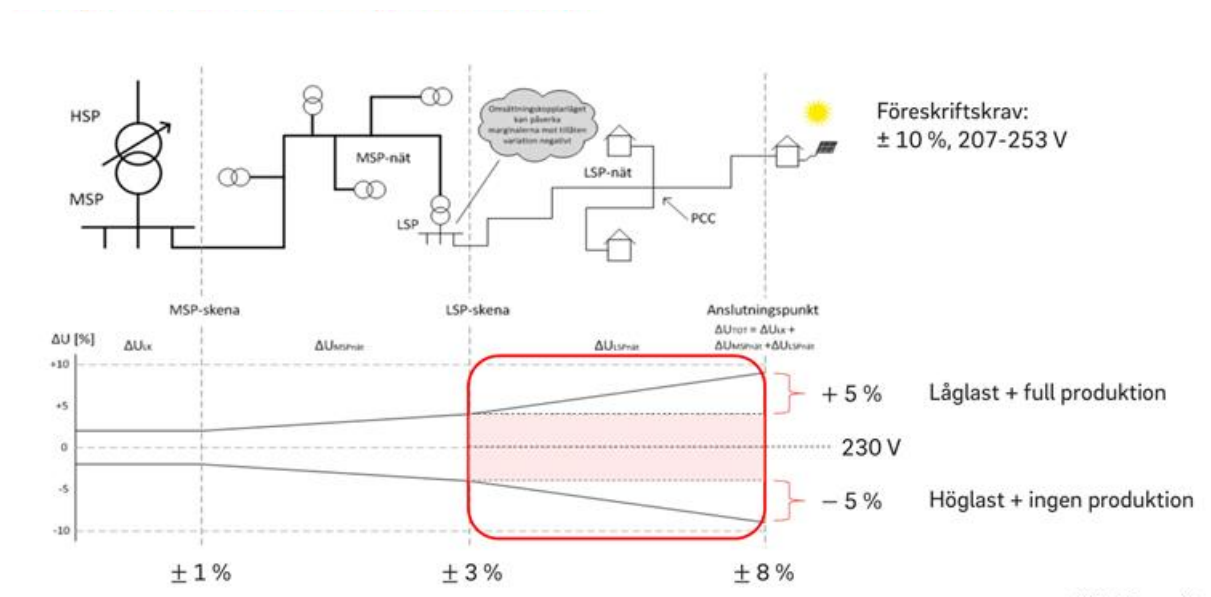
Tabell 2.4: Gränser för snabba spänningsändringar upp till och med 45 kV [16].

Snabba spänningsändringar	Antal per dygn
$\Delta U_{\text{stationär}} \leq 3 \%$	24
$\Delta U_{\text{max}} \leq 5 \%$	24

2.3.2 Spänningsvariationer i olika delar av elnätet

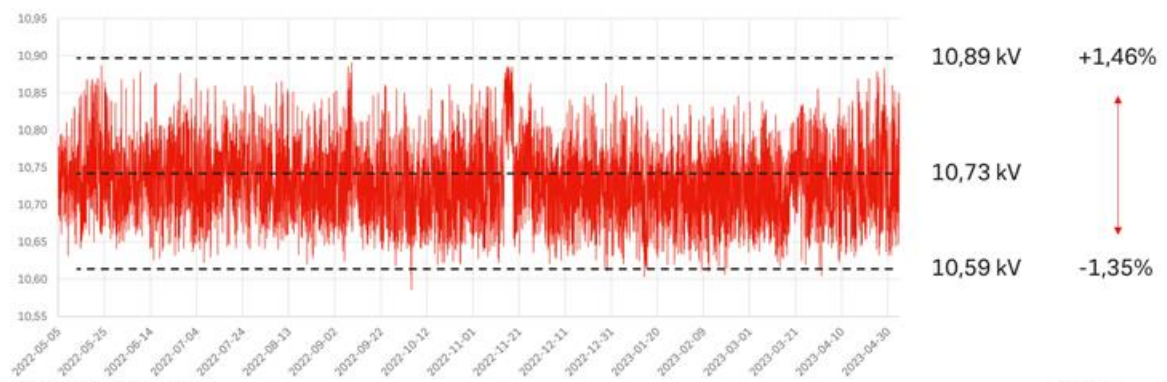
Det nämndes tidigare att den totala spänningsvariationen i nätet måste hållas inom $\pm 10\%$ av nominell spänning. Detta innefattar hela vägen från produktion till konsumtion. Spänningsvariationerna på totalt $\pm 10\%$ kan inte endast ske hos kunden, eftersom det då inte finns marginal till variationer som kan ske längst med vägen [17]. E.ON har riktlinjer inom vilka gränser spänningen bör ligga inom för mellanspänningsnätet. Figur 2.2 nedan visar både för mellanspänningsskenor och lågspänningsskenor, där mellanspänningsskenan får ha en variation på $\pm 1\%$ [18]. När

variabel elproduktion i form av till exempel solceller kopplas in till 10 kV sidan av fördelningsstationen innebär det tillåtna spänningsvariationer mellan 9,9 och 10,1 kV.



Figur 2.2: Spänningsvariationer över olika delar en elnätet [18].

I figur 2.3 visas hur dessa spänningsvariationer i medel per timme under ett år kan se ut i en fördelningsstation. Utifrån figuren kan det avläsas att spänningen varierat lite över $\pm 1\%$, det beror på att det ska finnas marginal för att spänningen ska kunna variera lite mer än $\pm 1\%$.



Figur 2.3: Spänningsvariationer i medel per timme i en fördelningsstation [17].

2.3.4 Övertoner

Med en ökande användning av olinjära laster ökar även övertonerna i nätet. Olinjära laster kan vara variabel elproduktion som exempelvis sol- och vindkraft. De genererar sin växelspanning med hjälp av växelriktare, vilka består av halvledarkomponenter som kan ge upphov till ström- och spänningsvågsformer. Genom den förvrängda strömmen och spänningen kan den ideala sinusvågen på 50 Hz deformeras och innehålla övertoner [19]. Ett medelvärde av spänningskvalitetsparametrarna under en tiominutersperiod får inte överskrida gränserna i tabell 2.5. Den totala övertonshalten (Total Harmonic Disortion, THD) ska vara mindre eller lika med 7,3% [16], se ekvation 4.

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n>1}^{n_{\max}} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \quad (4)$$

Där n anger övertonsnummer. U_1 är spänningens grundfrekvens. U_n är spänningens övertton vid n :e multipln. Samma formel används för strömmen, med kvoten av I_n och I_1 .

Tabell 2.5: Gränser för spänningsövertoner från 1 kV upp till och med 36 kV. [16]

Udda övertoner				Jämna övertoner	
Ej multiplar av 3		Multiplar av 3			
Överton (n)	Relativ övertonshalt [%]	Överton (n)	Relativ övertonshalt [%]	Överton (n)	Relativ övertonshalt [%]
5	5,5	3	4,0	2	1,9
7	4,5	9	1,3	4	1,0
11	3,3	15	0,5	6... 24	0,5
13	2,8	21	0,5	-	-
17	2,0	-	-	-	-
19	1,5	-	-	-	-
23	1,5	-	-	-	-
25	1,5	-	-	-	-

2.3.5 Transienter

Transienter är snabba, kortvariga och enskilda övergående förändringar på spänningsamplituden. Transienter kan uppstå av åsknedslag från överliggande elnät, eller genom till- och frånslag av tyngre elutrustningar i lokala nät. Elektronik är väldigt känslig för transienter, därför finns det EMC-krav för konsumentelektronik. Det finns inte mycket man kan göra i elnätet för att förhindra transienter, åska genererar transienta pulser i alla ledningsnät. Elektronik måste konstrueras för att tåla dessa transienter [19].

2.3.3 Flimmer

Flimmer är återkommande variationer i spänningens effektivvärde, spänningen fluktuerar. Detta kan ske till följd av ökad strömförbrukning av till exempel en hiss eller industrimaskin. Variationen ger upphov till ljusflimmer vilket kan upplevas som störande, men det är inget som är skadligt för utrustningen, till skillnad från transienter som kan göra skada på apparater [19]. Upplevelsen av flimmer bestäms av ett korttidsvärde (P_{st}) och långtidsvärde (P_{lt}). Korttidsvärdet mäts över en 10 minuters period. Långtidsvärdet beräknas utifrån en sekvens av korttidsvärden enligt ekvation 5.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st_i}^3}{12}} \quad (5)$$

Långtidsvärdet ska vara mindre än eller lika med 1, för att det ska anses som god elkvalitet [16].

2.4 Fördelningsstationer

Stationer i elnätet är anläggningar som används för att överföra och distribuera elektricitet från kraftverk till slutkonsumenter. Elstationer fungerar som noder i elnätet, alltså knutpunkter där elen kan fördelas vidare. Det är viktigt för att elnätet ska fungera korrekt och vara driftsäkert. Elstationer finns placerade på olika ställen i elnätet beroende på hur hög eller låg spänning som den ska distribuera. En viktig komponent i elstationer är transformatorer som antingen transformerar upp eller ned spänningen [8].

Det finns stamstationer, fördelningsstationer och nätstationer. Fördelningsstationer är en typ av station som ansvarar för att ta emot högspänningselektricitet från transmissionsnät på 130 kV och omvandla den till en lägre spänning för distribution till lokalnätet, som sedan distribuerar vidare elen till hushåll och industrier. Det är viktigt att fördelningsstationer fungerar korrekt för att säkerställa att elen når slutkonsumenterna på ett säkert och effektivt sätt [1].

2.4.1 Typer

Fördelningsstationer är ställverk som transformerar ner ungefär 130 kV till exempelvis 10 kV. Det finns olika typer av ställverk: luftisolerade- och gasisolerade. Luftisolerade ställverk (Air Insulated Switchgear, AIS) utnyttjar luftens isoleringsförmåga, därför behöver de byggas med tillräckliga luftavstånd. Gasisolerade ställverk (Gas Insulated Switchgear, GIS) utnyttjar ofta gasen SF₆, svavelhexafluorid. Gasen isolerar bättre än luft, vilket gör att GIS-ställverk tar litet utrymme jämfört med AIS-ställverk [20].

2.4.2 Brytare

Brytare kontrollerar ett kraftverk genom att bryta eller koppla samman elektriska strömmar. Den kan automatiskt öppna eller stänga kretsar under drift eller vid överbelastning och kortslutning. Brytare skyddar elektriska system och säkerställer att de fungerar korrekt [20].

2.4.3 Frånskiljare

Till skillnad från brytare används frånskiljare inte för att bryta strömmar, utan i stället för att isolera en elektrisk krets eller komponent från strömförsörjning. Detta görs under underhåll eller reparation för att säkerställa att det inte går någon ström i delen av system som det arbetas på. Frånskiljare kan inte bryta ström under drift, de är avsedda att använda under underhållsarbeten [20].

2.4.4 Reläskydd

Reläskydd kan ses som säkringar. När ett fel uppstår, som en kortslutning eller överbelastning, så känner reläskyddet av det och agerar genom att till exempel slå av en brytare. Det är viktigt att reläskydden fungerar korrekt för att skydda utrustning, annars skulle apparater och människor skadas av höga strömmar [20].

2.4.5 Transformatorer

Transformatorer är viktiga för att transformera ned spänning och ström till lämpliga nivåer. Transformatorer kan delas in i två grupper; mättransformatorer och krafttransformatorn, som finns vid stationer i elnät. Mättransformatorer delas in i spännings- och strömtransformator. Spänningstransformatorer används för att mäta spänningen i en krets. Den är designad för att skapa en proportionell spänning på sekundärsidan som är mycket mindre än spänningen på primärsidan. Detta gör det möjligt att mäta höga spänningar utan att ansluta mätinstrumenten direkt till den höga spänningen. Primärlindningen har fler varv, som kopplas in parallellt med högspänningsnätet som ska mätas. Sekundärlindningen har färre varv och är ansluten till voltmetern eller effektmätaren. Strömtransformatorer används för att mäta strömmen i en krets. Den fungerar på samma sätt som en spänningstransformator, men i stället för att sänka spänning, sänker den ström. Primärlindningen är ofta lindad med tjocka ledningar, med färre varv. Den är konstruerad för att kopplas direkt i serie med strömledningen som ska mätas. Sekundärlindningen har fler varv, och används för att minska den stora strömmen på primärsidan. Krafttransformatorn används för att transformera elektrisk spänning mellan olika nivåer i elnätet, från exempelvis högspänning (130 kV) till mellanspänning (10 kV), eller tvärtom. Syftet är att effektivt överföra el över långa avstånd och anpassa spänning till rätt nivå för industrier eller

hushåll. Typen av transformator som studeras i detta examensarbete är krafttransformatorn, då det är den aktiva komponenten i fördelningsstationer [21].

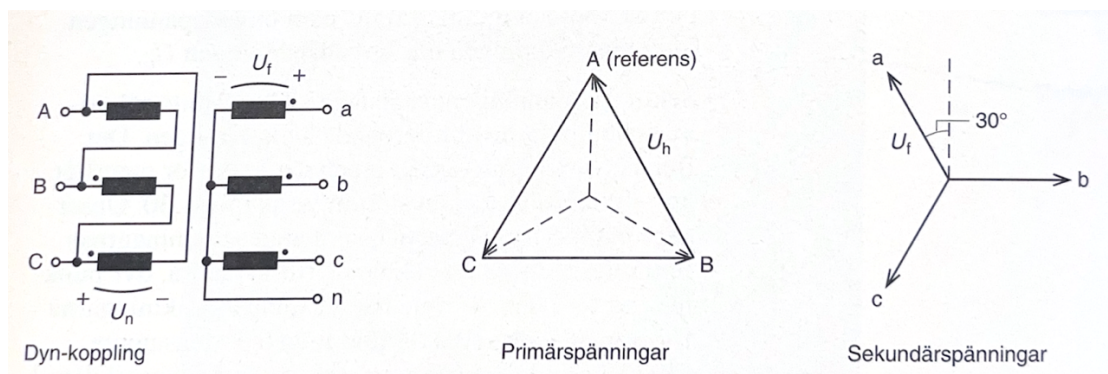
Förhållandet mellan primär och sekundärsida på transformatorerna ges av följande samband. Ekvation 6 visar för spänningstransformatorn [22].

$$\frac{U_{\text{primär}}}{U_{\text{sekundär}}} = \frac{N_{\text{primär}}}{N_{\text{sekundär}}} \quad (6)$$

Ekvation 7 visar för strömtransformatorn.

$$\frac{I_{\text{primär}}}{I_{\text{sekundär}}} = \frac{N_{\text{sekundär}}}{N_{\text{primär}}} \quad (7)$$

Trefastransformatorer har olika kopplingar, se figur 2.4. Det finns flera anledningar till att det är så, den huvudsakliga förklaringen är för att uppfylla olika tekniska behov. Historiskt sett har också betydelse, om de har kopplats på ett visst sätt en gång i tiden, underlättar det att fortsätta använda samma koppling. Olika nätägare kan använda olika kopplingar på transformatorer. Exempelvis kan Vattenfall föredra en viss koppling, medan E.ON föredrar en annan.



Figur 2.4: Dyn-kopplad transformator. Till höger i figuren visas två vektor diagram, för primär- och sekundärspänning [21].

Som tidigare nämnts används olika kopplingar för olika ändamål, beroende på spänningsnivå, driftmiljö, skydd och funktion i elnätet. Nollpunktsbildare används för att skapa en nollpunkt om en sådan inte finns i transformatorn [23]. I en Z-kopplad transformator finns det en nollpunkt naturligt. Därför är det bra att använda Z-koppling om det förekommer osymmetri i nätet. Detta eftersom Z-kopplingen ger en symmetrisk

nollpunkt. Vanligt är att Z-kopplingen sitter på högspänningssidan på transformatorn i mellanspänningsnätet.

I en Y-koppling kopplas faserna ihop med en gemensam nollpunkt. Precis som Z-kopplingen. Denna sitter oftast på lågspänningssidan på transformatorn i mellanspänningsnätet. I fördelningsstationer är det vanligt att transformatorerna kopplas enligt till exempel YNzn11. De stora bokstäverna visar kopplingen på högspänningssidan och de små bokstäverna lågspänningssidan. Numret visar vilken fasvridning transformatorn här, nummer 11 innebär en fasvridning på 30 grader, vilket är vanligt förekommande.

D- eller deltakopplingen har ingen nollpunkt, då faserna kopplas i en triangel, se figur 2.4. Det gör att ingen nollsekvensström kan flyta genom den. Övertoner av tredje multipeln är i fas i alla tre faser, den kan endast existera i nät där ström kan flyta i nollpunkten. Det resulterar i att 3e övertonen fastnar i D-kopplingen och roterar eller dämpas. Den blockeras från att spridas vidare i nätet. Detta kan överbelasta nollledaren och ge konsekvenser för kablar och transformatorn i form av värme [21].

2.4.6 Lindningskopplare

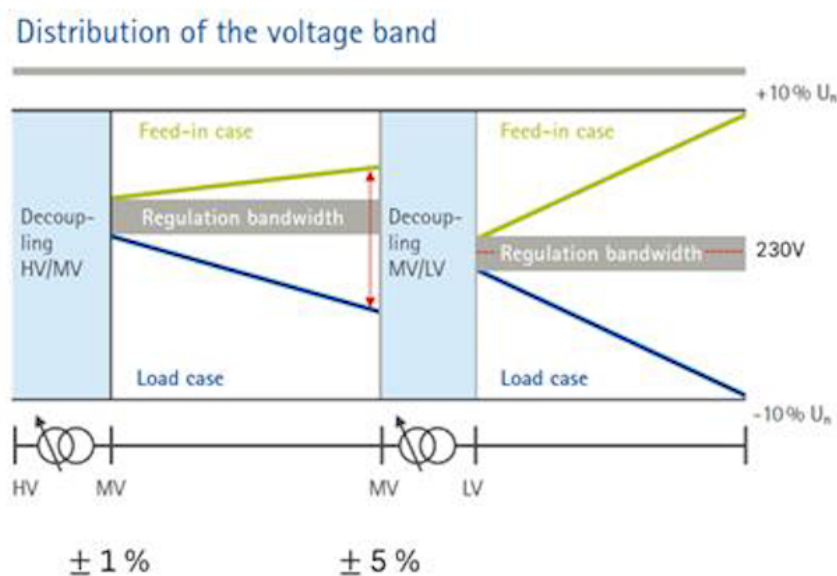
Används på transformatorer för att reglera sekundärspänningen till önskad nivå. När spänningsfallet blir för stort på grund av stora laster måste antingen lasten eller kortslutningsimpedansen minskas. Industriella transformatorer och transformatorer vid högre spänningar använder sig av en kopplingsutrustning som tillåter omkoppling av lindningsvarven [8]. Det är en stor utmaning att hålla jämn spänning i nätet när det finns mycket produktion. Lindningsomkopplare ska sköta det, och misslyckas den med detta kan det få stora konsekvenser [13].

Ett exempel på det är i Västra Hamnen 2011 när en lindningskopplare som E.ON äger gick sönder. Det ledde till att Västra Hamnen i Malmö som stationen försörjde fick alldeles för hög spänning. Elektronisk utrustning som var kopplade till vägguttagen gick sönder, allt från tv-apparater till tvättmaskiner, mikrovågsugnar och diskmaskiner [24].

Vanligt för lindningskopplare i fördelningsstationer är att de kan koppla om enligt ekvation 8 nedan. Omkopplingen sker på högspänningssidan.

$$U_{\max/\min} = U_{\text{nominell}} \pm 9 \cdot 1,67\% \quad (8)$$

Det innebär att lindningskopplaren kan koppla i nio steg och varje steg kan ske med en ökning eller minskning på 1,67% av nominell spänning. Vilket totalt innebär en variation på $\pm 15\%$ som i spänning innebär mellan ca 110 och 150 kV om $U_{\text{nominell}} = 130$ kV. Detta är ett mått på hur mycket lindningskopplaren kan koppla om, men max- eller minlägena bör undvikas eftersom då saknas marginaler och tyder på extrema förhållanden i nätet. I figur 2.5 nedan visas hur en lindningskopplare kopplar om för att hålla spänningen inom önskat område. Den blå linjen visar hur spänningen sjunker när mycket last är ansluten. Den gula linjen visar hur spänningen stiger när produktionen är hög. Bilden illustrerar även spänningsfallet i procent som bör hållas över fördelningsstationen och nätstationen.

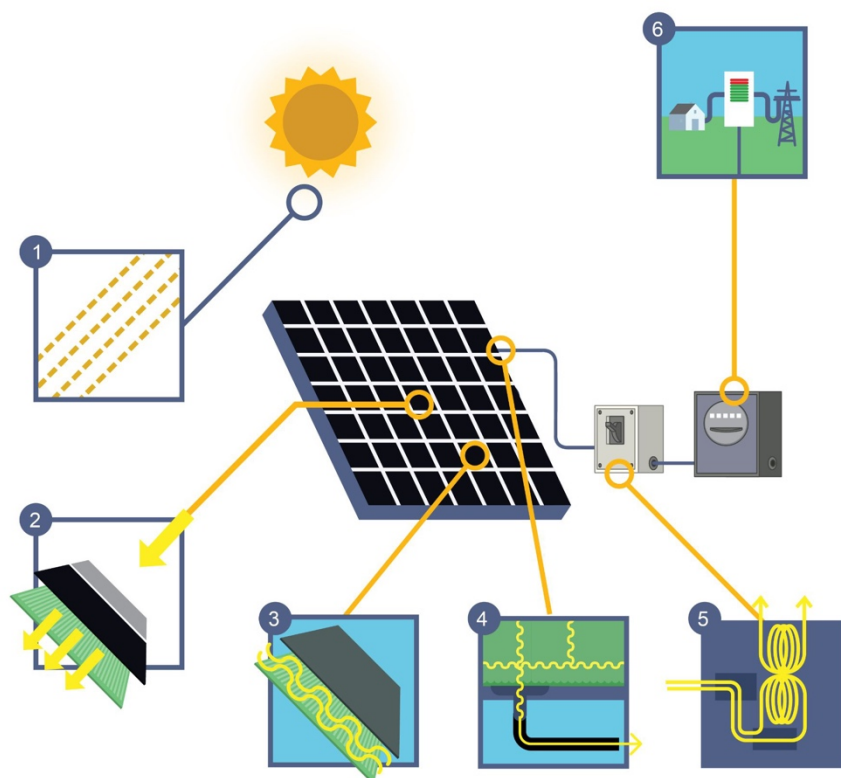


Figur 2.5: Lindningskopplaren illustreras som en pil ovanpå transformatorerna [17].

Enligt E.ON kontrolleras det vid dimensionering att det inte ska kunna ske för stora spänningsvariationer vid in- och urkoppling av anläggningar. Det brukar sällan bli en direkt in-och urkoppling, om det är en stor anläggning så är det uppdelat i flera mindre segment. Regleringen för långsamma spänningsändringar brukar hinna med att reglera spänningen om spänningen varierar från en tidpunkt till en annan. Lindningskopplare ska hinna med att reglera spänningsnivån i tid för att inte överskrida gränser för vare sig kortvariga eller långvariga spänningsvariationer. Kraftsystemsanalytiker ska även bli informerade om det ansluts någon större produktion till nätet [17].

2.5 Solceller

Solceller skiljer från annan variabel elproduktion, eftersom dem inte består av någon generator som snurrar. De består av halvledarmaterialet kisel som fångar solens strålning och omvandlar det till el genom en fotovoltarisk process, se figur 2.6.



Figur 2.6: Processen från solljus till elektrisk ström ut på nätet [25].

Den fotovoltaiska processen börjar med att solljuset når solcellen och dess fotoner absorberas av halvledarmaterialet kisel. När kisel absorberar ljuset, exciteras elektronerna i materialet, vilket skapar en elektrisk spänning mellan cellens framsida och baksida. För att utnyttja denna spänning och skapa en användbar elektrisk ström, kopplas fram- respektive baksidan av solcellen samman med varsin ledning. Detta gör att elektronerna börjar flöda längs ledningen från cellens ena sida till den andra, vilket genererar en elektrisk ström i form av likström. Denna likström måste dock omvandlas till växelström för att kunna användas i hushåll, industrier eller levereras till det allmänna elnätet. En växelriktare används för att utföra denna omvandling, vilket gör det möjligt att använda solenergin för att driva apparater och system som kräver växelström [25].

Om flera solceller kopplas samman i serie ökar den totala spänningen i systemet, medan parallellkoppling av celler ökar den totala strömstyrkan, se figur 2.7 [26].



Figur 2.7: Närbild på hur en solcellsanläggning är uppbyggd av flera solceller [41].

Tillverkningsprocessen för solceller är det som har störst miljöpåverkan, det tar ca 12–18 månader innan solceller producerat lika mycket energi som det gick åt att tillverka dem [27].

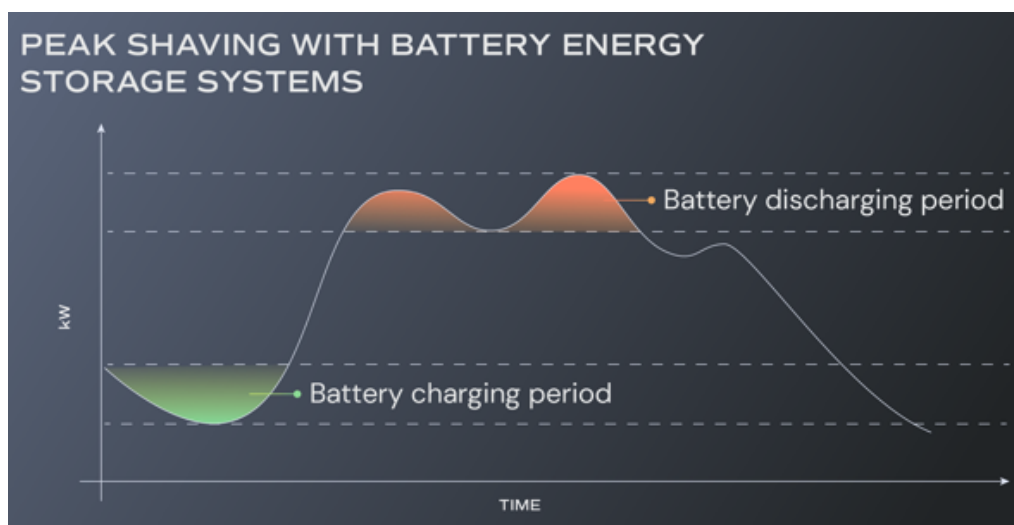
Produktionen av solkapacitet ökar ständigt, år 2023 installerades över 55 GW ny solkapacitet i EU, det är en ökning med 40% från 2022. En utmaning för solceller i framtiden kommer vara att den snabba expansionen av solceller kräver investeringar i elnätet. Om den förnybara energikapaciteten ska tredubblas till 2030 kommer det behöva byggas 25 miljoner kilometer nya ledningar i elnätet [28].

Anledningen till att solceller har valts som elproduktion i detta arbete är på grund av att det blir vanligare och vanligare. Vindkraftsverk har funnits längre och har studerats mer.

2.6 Energilagring

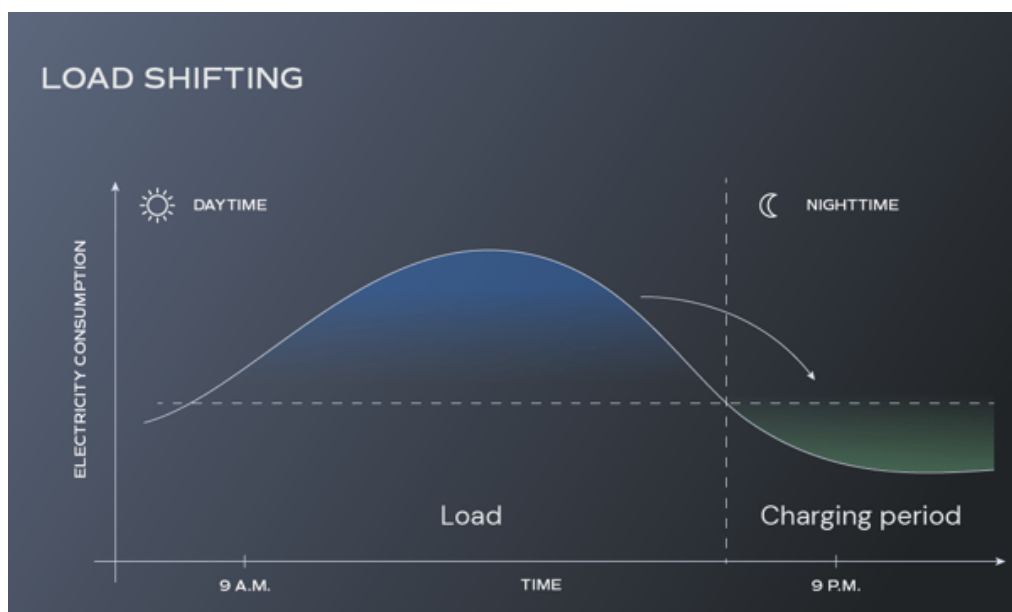
Energilagring i batterier underlättar tillgång till stabil el, med hjälp av tjänster som frekvensreglering, peak-shaving och självförsörjning. Batterier är en lösning för att kunna hålla balans och justera elnätet vid behov. Energilagring innebär att batterier kan lagra överskottsenergi när efterfrågan är låg och när det uppstår obalans i nätet. Ett batterilagringssystem består av flera komponenter som var och en har specifika roller för att bidra med en effektiv och säker distribution av energi [29].

För att elnätet ska fungera måste frekvensen alltid hållas inom en viss gräns. I Sverige ska frekvensen balanseras på 50 Hz. Vid överproduktion stiger frekvensen och vid underproduktion sjunker den. Om frekvensen inte hålls stabil eller avviker för mycket från det nominella värdet kan det ge många konsekvenser. Det kan leda till obalans i elnätet vilket i sin tur kan orsaka stora kostnader för samhället. Batterier har en snabb responsförmåga och kan med hjälp av frekvensreglering reagera på förändringar i frekvensen och justera tillförsel av el [30]. Peak-shaving är en strategi för att undvika toppbelastningskostnader på elnätet genom att snabbt minska strömförbrukningen under intervaller med hög efterfrågan, se figur 2.8. Maximal minskning kan åstadkommas genom att antingen stänga av utrustningen eller genom att använda energilagring såsom batterilagringssystem på plats. Målet med peak-shaving är att eliminera kortsiktiga toppar i efterfrågan och minska de totala kostnaderna förknippade med elförbrukning [31].



Figur 2.8: Upp- och urladdning av batterier beroende på den totala efterfrågan på effekt i elnätet [33].

Med batterilagring kan en privatperson eller företag lagra el från elnätet. Detta gör det möjligt att bli mer självförsörjande med ett eget energilager. Det går då att lagra energi på natten när den är som billigast och sedan använda den lagrade energin på dagen när det är dyrt med el, se figur 2.9. Tack vare detta får du som privatperson eller företag bättre koll på din elkonsumtion [32].



Figur 2.9: Lastförskjutning av elförbrukningen från dag till natt [33].

3. Metod

Swecos önskan var att kolla närmre på elkvaliteten i fördelningsstationer i mellanspänningsnätet, med tanke på konsekvenser av utbyggt variabel elproduktion. Detta kapitel beskriver vilka metoder som använts för att genomföra arbetet.

3.1 Litteraturstudie

Litteraturstudier i form av forskningsartiklar och läroböcker har använts i detta arbete för att öka förståelsen och teorin kring elkvalitet. Litteraturstudien innehåller regler och gränser som skall följas som har tagits från standarder. Det beskrivs även hur elnätet ständigt utvecklas och står inför utmaningar kring integration av variabel elproduktion.

3.2 Intervju

Under arbetet har det genomförts intervjuer med olika nätägare som ytterligare underlag för datainsamling. Elnätsägare och företag som har intervjuats presenteras nedan.

3.2.1 Öresundskraft

Öresundskraft har anläggningar i Helsingborg och Ängelholm, deras elnät består av cirka 440 mil ledningar och 1350 transformatorstationer, där ett antal är fördelningsstationer av det slag som studeras i detta arbete. Stationerna omvandlar först 130 kV till 50 kV, sedan ner till 10 kV och sist ut till hushållen där det är 230 V [34].

3.2.2 dLab

Företaget dLab härstammar från ett forskningsprojekt i Lund. Konceptet är att mäta spännings- och strömsignaler som samplas och samlas ihop, för att sedan skickas till en central server där analysen sker [13]. dLab fungerar som ett reläskydd fast möjliggör felsökning och kan därmed minska antalet avbrott. Genom övervakning av viktiga tillgångar i fördelningsstationer möjliggörs underhåll. Tack vare effektivare felsökning kan elkvalitetsproblem identifieras [35]. dLab har därför god insyn i hur elkvaliteten ser ut i olika delar av elnätet.

3.2.4 E.ON

E.ON bedriver sin verksamhet på region-, mellanspännings- och lågspänningsnivå. Det innebär spänningsnivåerna 130 till 40 kV på regionnivå, 20 till 10 kV på mellanspänningsnivå och sist 400 V på lågspänningsnivå [36]. E.ON:s ansvar är att leverera god spänningskvalitet till kunderna, se till att nätet är rätt byggt för anslutningar. Se till att kortslutningseffekten är tillräcklig för att nätet ska klara av att stå emot störningar. De ansvarar också för att bevaka nätet, ser till att kunder inte stör på nätet. Det viktigaste är framför allt ett rätt dimensionerat nät [17].

3.2.5 Halmstads Energi

Halmstads Energi och Miljön Nät AB äger och ansvarar för elnätet i Halmstads tätort [37].

3.3 Simulering

För att visa hur elkvaliteten påverkar fördelningsstationer har simuleringar gjorts i programmet DIg SILENT PowerFactory. Det finns andra typer av simuleringsprogram, som till exempel är NePlan och MatLab. I detta arbete har PowerFactory valts, dels för att det är användarvänligt, men dels för att Lunds Tekniska Högskola har lisenser för studenter. Simuleringen delas in i tre olika scenarion där det kopplas in variabel elproduktion i form av solceller nära fördelningsstationen. Simuleringarna undersöker i första hand hur spänningsvariationer orsakade av variabel elproduktion påverkar en fördelningsstation. Sedan undersöks hur övertoner genererade av solceller påverkar fördelningsstationen.

3.3.1 Spänningsvariationer

Undersökning av spänningsvariationer har gjorts med dynamiska simuleringar i programmet. Inkopplingen av solcellernas effekt kan ses som att solen börjar lysa på en solcellsanläggning efter att ha varit i moln. Det har simulerats med hjälp av brytas som slås till och från. Nätägare blev kontaktade för att kunna samla in rättvis data för att efterlikna en fördelningsstation. Data som har använts är exempelvis, impedans i kablar, kortslutningseffekt, märkeffekt och kortslutningsspänning.

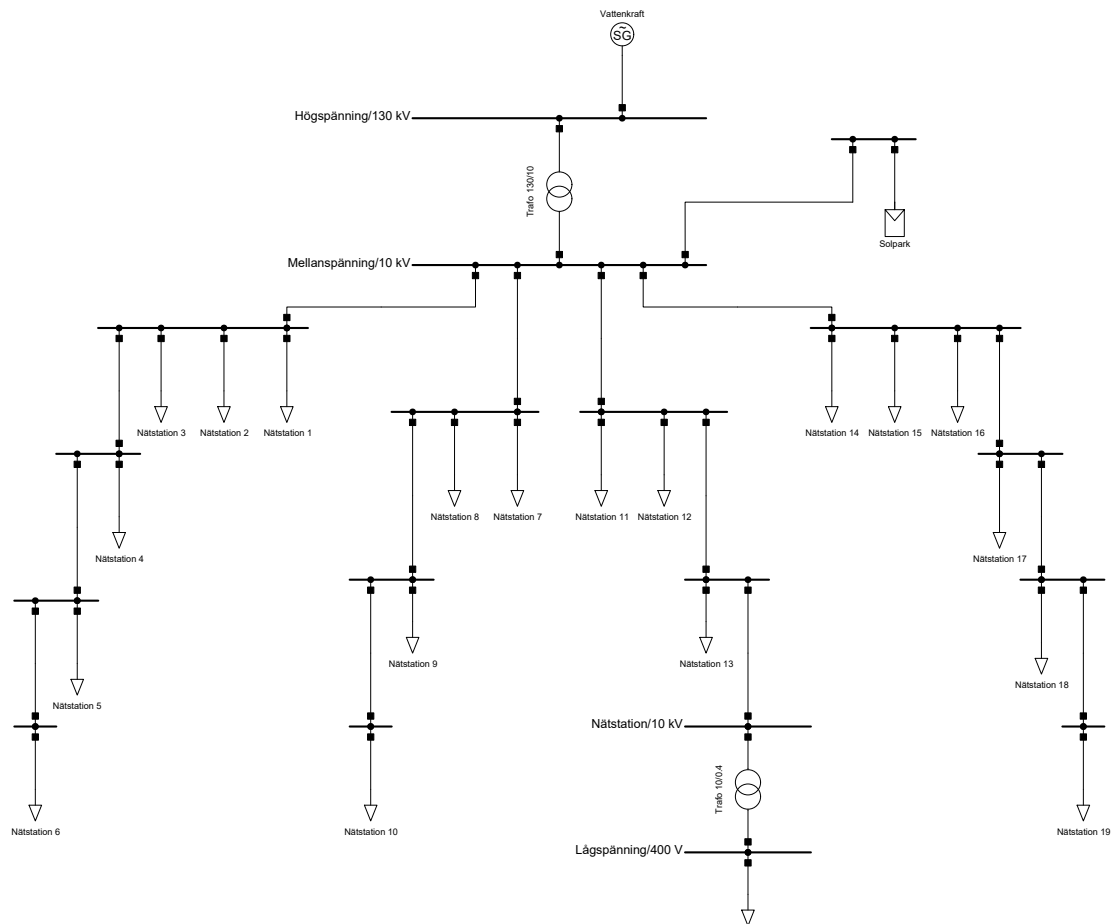
3.3.2 Övertoner

Modellen som används för att undersöka spänningsvariationer används också för undersökning av övertoner. Strömövertoner som injicerades till solparken i modellen, är hämtade från några tillverkare av solcellsväxlerriktare. För att kunna använda och undersöka data som deras växlerriktare genererar. I resultaten mäts övertonshalten i procent av nominell spänning, alltså som spänningsövertoner.

3.3.3 Modell

Modellen för fördelningsstationen är baserad på insamlad data för olika fördelningsstationer och är alltså inte en exakt kopia av en specifik station. Resultaten kan därmed användas som generell fingervisning, men ger inga svar om exakta gränser eller värden för en enskild station. PowerFactory erbjuder både färdiga bibliotek för komponenter att använda för simulering, men det finns även möjlighet att skapa det själv utifrån egna data.

I figur 3.1 visas modellen som använts för simuleringar i detta examensarbete. Fördelningsstationen är den huvudsakliga delen av modellen, vilket motsvarar 130 kV-skenan (högspänning), 10 kV-skenan (mellanspänning) och transformatorn mellan dessa skenor. Ovanför 130 kV-skenan är en synkrogenerator ansluten i form av vattenkraft som ska symbolisera det ovanliggande nätet. Synkronmaskinen har en governor implementerat för att kunna agera dynamiskt. Nedanför 10 kV-skenan är lasterna anslutna, dessa ska symbolisera noder längre ned i nätet, vilket kan vara exempelvis nätstationer. I en nod har en last förstorats upp där det går att se skenorna till nätstationen. Till 10 kV skenan kopplad till fördelningsstationen är även en solpark ansluten. Det är solparken som används för att producera effekt och övertonshalter som undersöks i simuleringarna.



Figur 3.1: Simuleringsmodell.

3.4 Studiebesök

Under arbetet gjordes det ett studiebesök på en fördelningsstation i Malmö. Stationen har varit ett luftisolerat ställverk, och ska nu byggas om till ett gasisolerat ställverk. Det finns olika för- och nackdelar med AIS jämfört med GIS. Fördelningsstationen ägs av E.ON och tar emot 130 kV från högspänningsnätet som transformeras ned till 10 kV som sedan matar en stadsdel i Malmö. På stationen finns två skenor, vilket är vanligt på de flesta fördelningsstationer. Det är endast en skena som är i drift åt gången, vilket gör att om en transformator går sönder, kan den ena skenan kopplas bort och stationen kan fortsätta försörja stadsdelen via den andra. Besöket har varit mycket användbart för att öka förståelsen kring fördelningsstationer och dess komponenter, som i sin tur har underlättat skrivandet av examensarbetet.

4. Analys

Olika produktionskällor bidrar med olika typer av störningar på elnätet. I tabell 4.1 nedan visas de fyra vanligaste produktionsslagen. Vindkraft är det produktionsslag där det finns risk för flest typer av störningar [18].

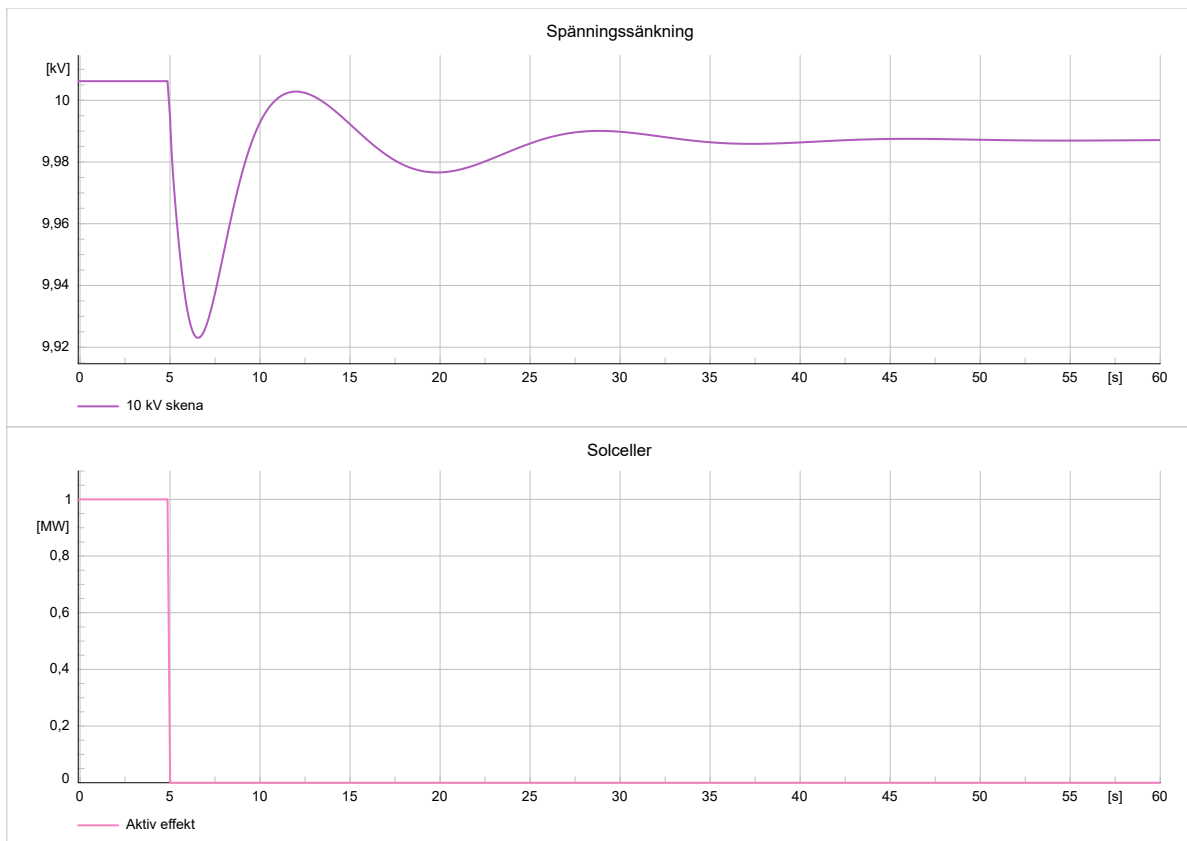
Tabell 4.1: Olika produktionsslags påverkan på nätet [18].

Produktionskälla	Störning			
	Maximal spänningsändring	Långvarig spänningsändring	Övertoner	Flimmer
Vindkraft	Ja	Ja	Ja	Ja
Solkraft	Ja	Ja	Ja	Nej
Vattenkraft	Ja	Ja	Nej	Nej
Kraftvärme	Ja	Ja	Nej	Nej

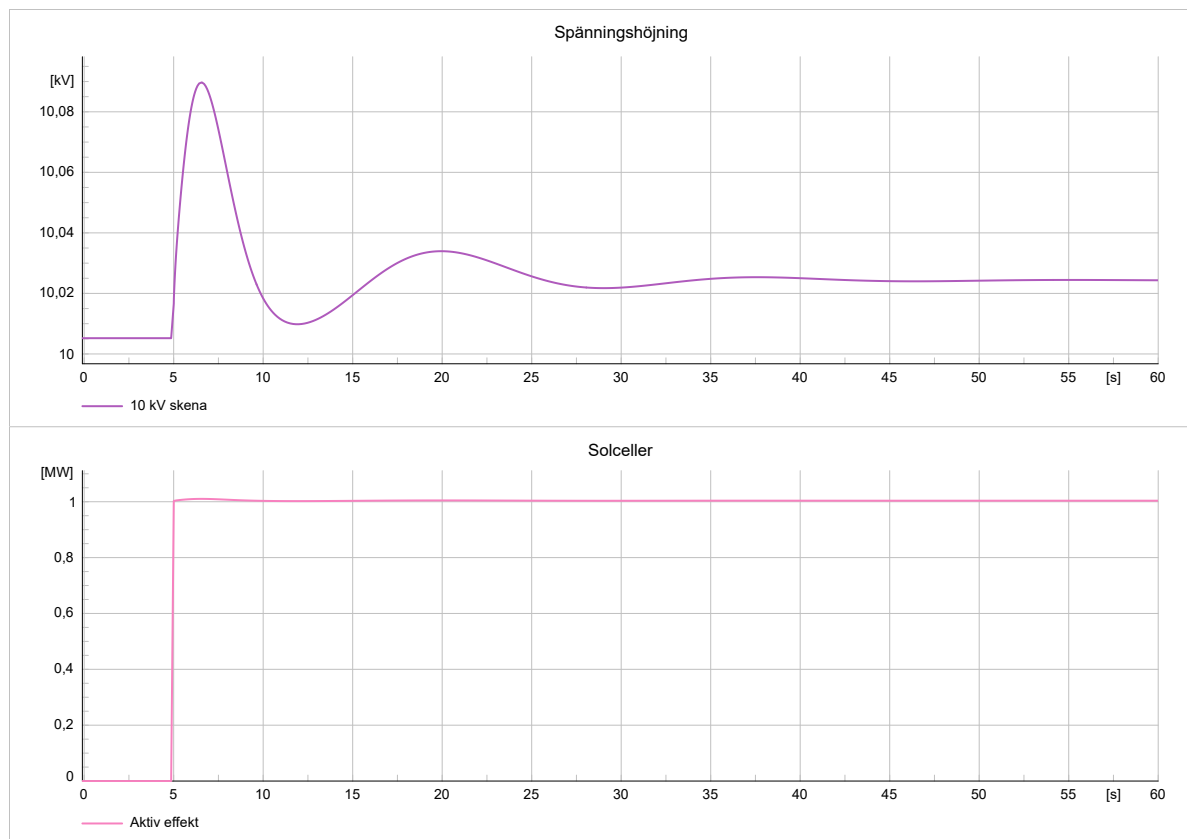
4.1 Spänningsvariationer

Går solen i moln så blir det en pendling i effekt, eftersom lägre effekt produceras när solcellerna är i moln. Är effektpendlingen stor i förhållande till den styrka man har i nätet så kommer det att påverka elkvaliteten. När man dimensionerar ett elnät så är detta en parameter som måste tas hänsyn till. Det samma gäller för vindkraftverk, där finns tre blad på rotorn och tornet de snurrar runt. När ett blad passerar tornet minskar vindstyrkan och dragkraften på bladet tillfälligt, vilket kan synas på den producerade effekten som flimmer [38].

Scenariona för undersökning av spänningsvariationer har gjorts med en dynamisk simulering. När solcellerna går i moln simuleras som att de slutar producera helt genom att brytaren slår ifrån, se figur 4.2. Tvärt om har gjorts när solcellerna är i moln och inte producerar effekt, för att sedan producera på max när solen börjar skina, se figur 4.3. I båda figurerna har x-axeln enheten tid i sekunder och y-axeln har enheten spänning i kV. Brytarna slås till respektive från vid fem sekunder.



Figur 4.2: Spänningssänkning.



Figur 4.3: Spänningshöjning.

I figurerna 4.2 och 4.3 visar den lila kurvans y-axel mellanledningsspänning U_{dc} [kV] mätt på 10 kV skenan i fördelningsstationen. På x-axeln visas tiden i sekunder [s]. Den rosa kurvan visar den producerade effekten från solcellerna, där y-axeln visar effekten [MW] mätt på 10kV skenan i fördelningsstationen. På x-axeln visas tiden i sekunder [s].

Höjningen respektive sänkningen av spänning är nästan identiska, fast spegelvända. På grund av detta kommer resultatdelen av rapporten endast presentera spänningshöjningar, då spänningssänkningarna kommer bete sig på samma sätt fast omvänt. Solkraftsanläggningar som är kopplade till 10 kV-nätet brukar ha en maxeffekt på ca 1-5 MW, men effekten kan även vara upp till 10 MW [13].

4.1.1 Variationer över transformatorn

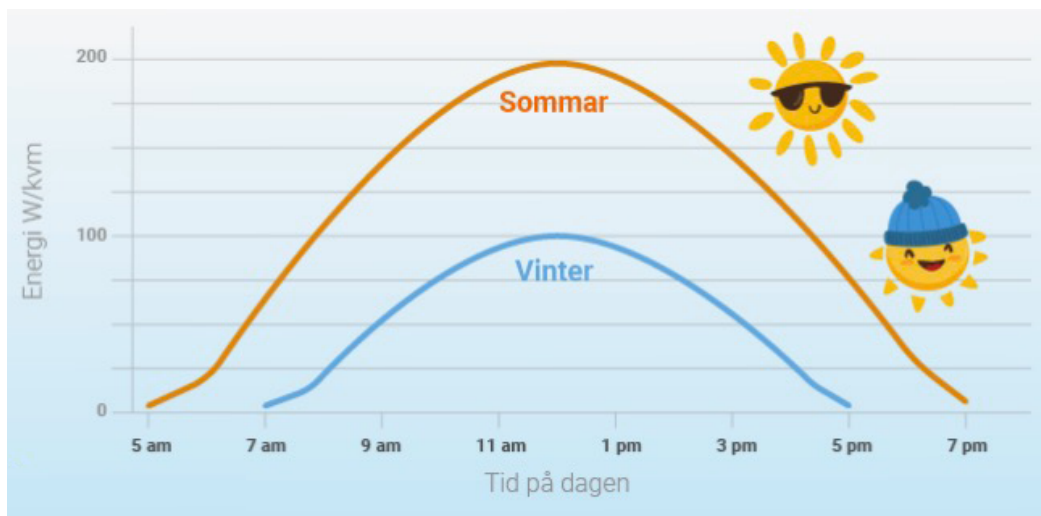
I avsnitt 2.3 visades det att det får ske spänningsvariationer på ca $\pm 1\%$ över transformatorn. Enligt märkdata på en transformator i en fördelningsstation ligger kortslutningsspänningen runt 7% och märkeffekten runt 25 MVA. Utifrån denna data om transformatorn kan det ställas upp ett enkelt samband enligt ekvation 9 nedan.

$$P_{PV\max} = \frac{1\%}{U_k} \cdot S_{n,trafo} = \frac{1\%}{7\%} \cdot 25 \approx 3.6 \text{ MW} \quad (9)$$

Det innebär att transformatorn bör klara av en variation från solceller som motsvarar ca 3,6 MW. Om den producerade effekten överstiger denna effekt kan spänningsvariationerna bli för stora, beroende på hur fort lindningsomkopplaren hinner kompensera. Om inte, krävs det batterier för att hålla spänningen och effekten på en jämn nivå.

4.1.2 Variationer sommar och vinter

På sommaren är det vanligtvis låg förbrukning i nätet, men hög produktion från solcellerna. På vintern är det tvärt om, hög last och låg produktion från solcellerna. Solcellerna kan nå en högre maxeffekt på sommaren, se figur 4.3. Det innebär att den plötsliga variationen i effekt från en solcellsanläggning är större på sommaren. Däremot har nätet större risk att överbelastas under vintern, på grund av den högre konsumtionen under vintern.



Figur 4.3: Solkraft under en dag [40].

4.2 Övertoner

Det som är gemensamt för både sol- och vindkraft som även syns i tabell 5, är att de båda kan orsaka störningar på elnätet i form av övertoner. Det beror på växelriktarna som finns i båda produktionskällorna. Växelriktaren omvandlar likspänning från solpanelerna till växelspänning på nätet. Den pulsar ut spänning i ett mönster och efter filtrering blir det en sinusvåg, därför finns det en oundviklig förekomst av övertoner [13].

Transformatorer i lågspänningsnätet som omvandlar från 10/0.4 kV är ofta av typen Dyn11, det innebär att det finns en deltalindning på uppsidan, se figur 2.4. På grund av denna deltalindning kan de trippla övertonerna inte ta sig upp genom transformatorn, de stannar kvar i lågspänningsnätet. I lågspänningsnätet är därför den 3e övertonen dominerande, men i mellanspänningsnätet ser man inte problemen de orsakar.

Nolledaren kan få stora strömmar om man har mycket av 3e övertonen, detta på grund av att om alla tre faser adderas är summan noll. Det kan bli så mycket att ledaren överbelastas, även transformatorn kan överbelastas. Detta fenomen kallas ”tredjetonsfenomenet” och kan orsaka skada i kablar och i transformatorer [39].

Övertoner i lågspänningsnätet filtreras alltså genom nätstationens transformator, den blir som ett lågpassfilter. Det blir mindre nivåer av elkvalitetsproblem ju högre upp man kommer i nätet, eftersom nätet är starkare och det sker filtrering på vägen [13]. I mellanspänningsnätet syns i stället 5e och 7e övertonen, detta beror på industrierna som är kopplade till nätet. Eftersom industritunga delar av nätet ofta har stora halter övertoner och flimmer [38].

Kopplas det in en elmaskin (trefasmaskin) till nätet, kommer den generera övertoner, framför allt 5e och 7e. Det är strömmen elmaskinen drar som ger upphov till övertonerna. Ju svagare nätet är i förhållande till den strömmen, desto mer kommer den ge upphov till ett spänningsfall, vilket leder till att strömövertonerna även påverkar spänningen. Det samma gäller för växelriktaren, som omvandlar likspänningen solcellerna producerar till växelspänning för att matcha elnätet. Växelriktaren kan därför också generera övertoner [38].

4.3 Transienter

Transienter uppkommer från bland annat åsknedslag eller vid kortslutningar och omkopplingar, inte av olinjära laster. Halmstads Energi har inte haft några problem med transienter vid inkoppling av kraftparker. Om det skulle ske något vid inkoppling tänker dem att reläskydden tar hand om det. Det ska även finnas ventilavledare och åskskydd för att skydda mot transienter [39].

4.4 Flimmer

Det som skiljer solkraft och vindkraft åt när det kommer till störningar är att det förekommer flimmer hos vindkraft. Det beror på att krafttillförseln från ett vindkraftverk ut till elnätet inte är helt jämnt. Tre gånger per varv hamnar bladet framför tornet, då hamnar det bladet i lä. Detta leder till en liten dipp i effektinflödet, det kan göra att spänningen fluktuerar på samma sätt, vilket kan bidra till flimmer [13].

Ju större effekten är i vindkraftverket i förhållande till den styrka man har i nätet, kommer det ge upphov till en påverkan. Är nätet svagt blir det en stor påverkan. Är det ett starkare nät blir det en mindre påverkan [38]. I starkare nät är det vanligare med vindkraftparker med flera turbiner och då är risken mindre att variationen i spänning överlagras.

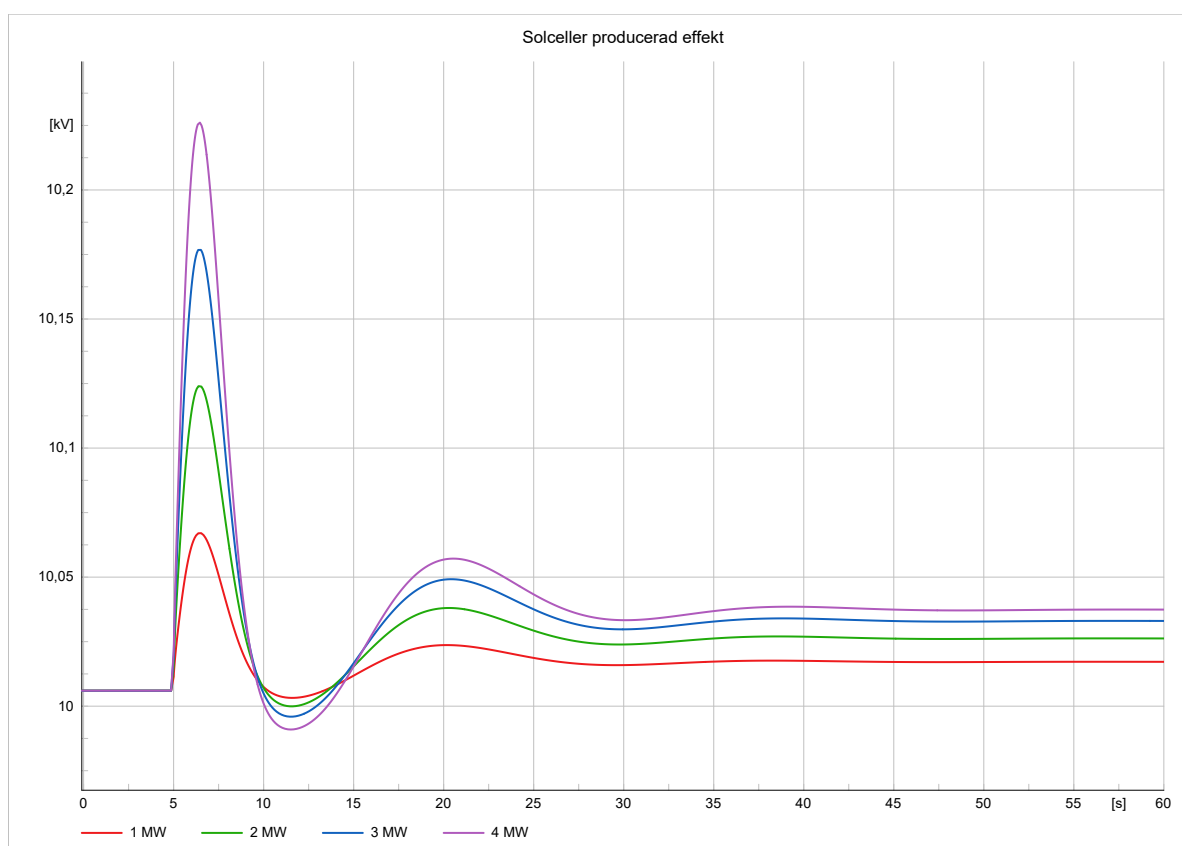
Den största källan till flimmer i nätet är tunga laster som drar ström ojämnt, till exempel gjutrier och ljusbågsugnar. Det beror på att belastningen varierar kraftigt under kort tid. Flimmer orsakar inte att apparater går sönder, snarare att det är störande för vissa komponenter, samt för människor om till exempel ljusstyrkan från en lampa varierar. Vid laddning av elfordon, när batteriet är nästan fulladdat trappas laddningen ner vilket kan ge upphov till flimmer om det inte sker jämnt. Det introduceras fler flimmerkällor i nätet [13].

5. Resultat

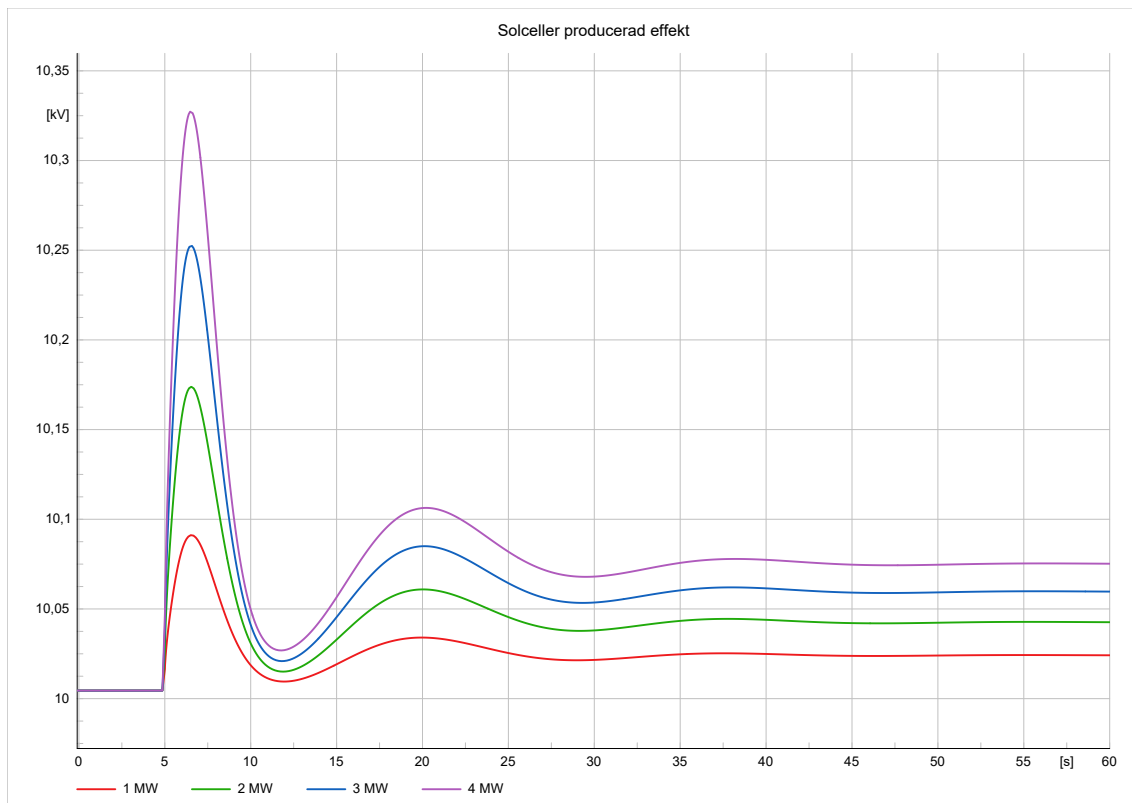
I programmet PowerFactory har spänningsvariationer och övertoner undersökts. Olika scenarier har satts upp och resultat har genererats som grafer. Nedan beskrivs de olika scenarier. I figurerna 5.1 till 5.6 visas mellanledningsspänning [kV] mätt på 10 kV skenan i fördelningsstationen (figur 3.1) på y-axeln och tiden i sekunder [s] syns på x-axeln.

5.1 Scenario 1

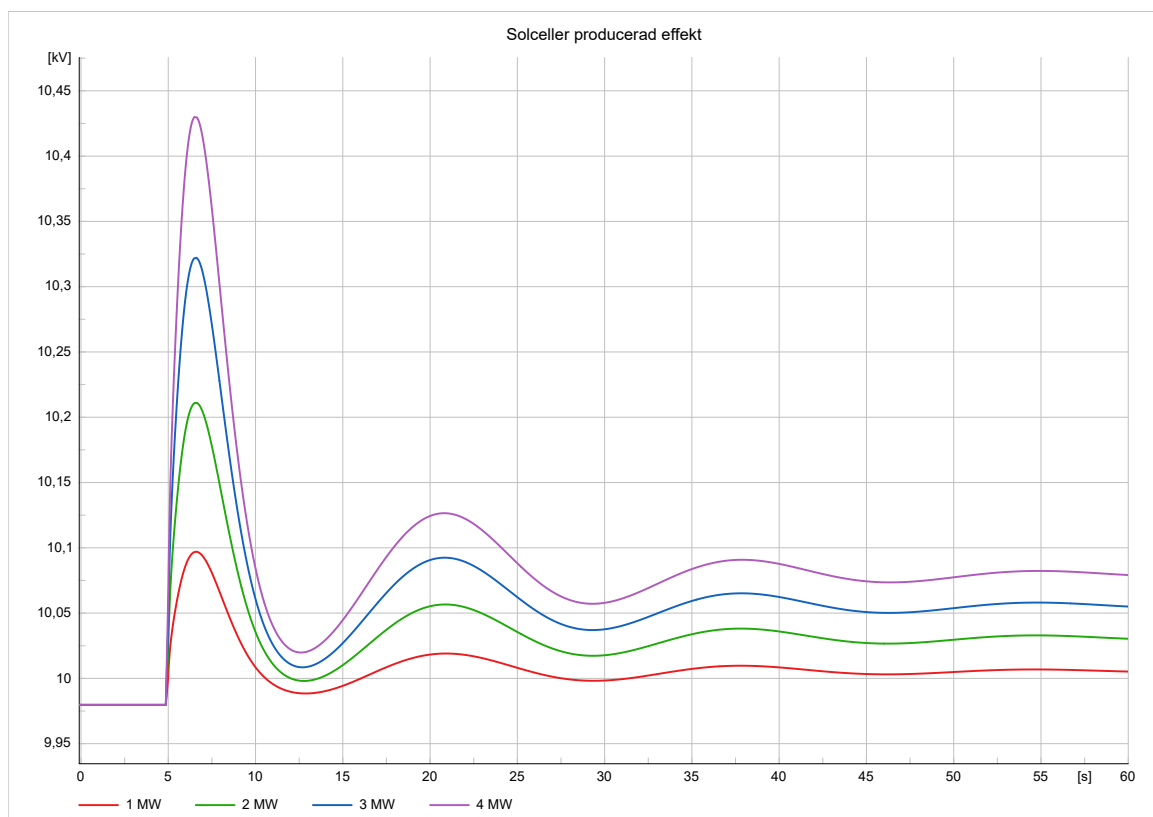
Solcellerna producerar ingen effekt till en början på då det är molnigt ute. Plötsligt blir det skinande sol och solcellerna börjar producera på maxeffekt. I detta scenario undersöks spänningshöjningar (tabell 5.1). Vid fem sekunder slås solcellerna på. Nedan jämförs parametrarna: producerad effekt från solcellerna, avstånd från fördelningsstationen och laster.



Figur 5.1: Olika producerad effekt från solceller med laster på 5 MW (låg last).



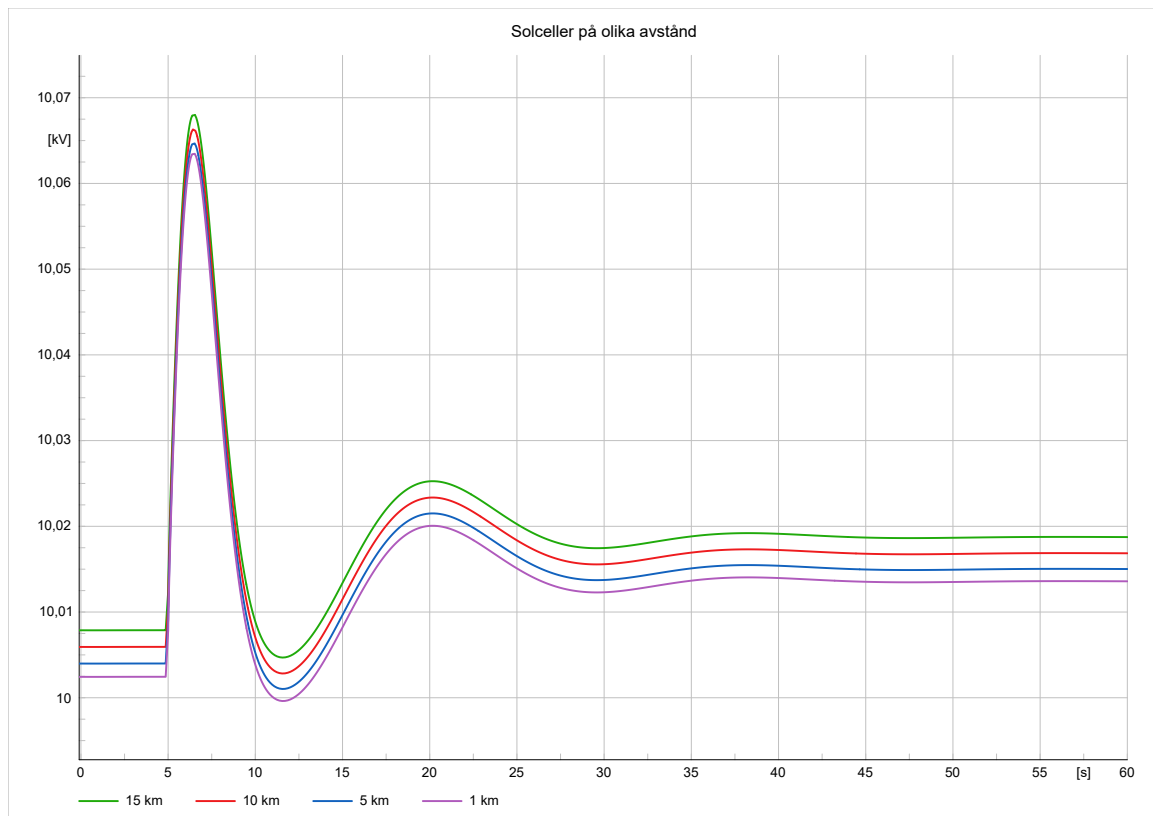
Figur 5.2: Olika producerad effekt från solceller med laster på 10 MW (medium last).



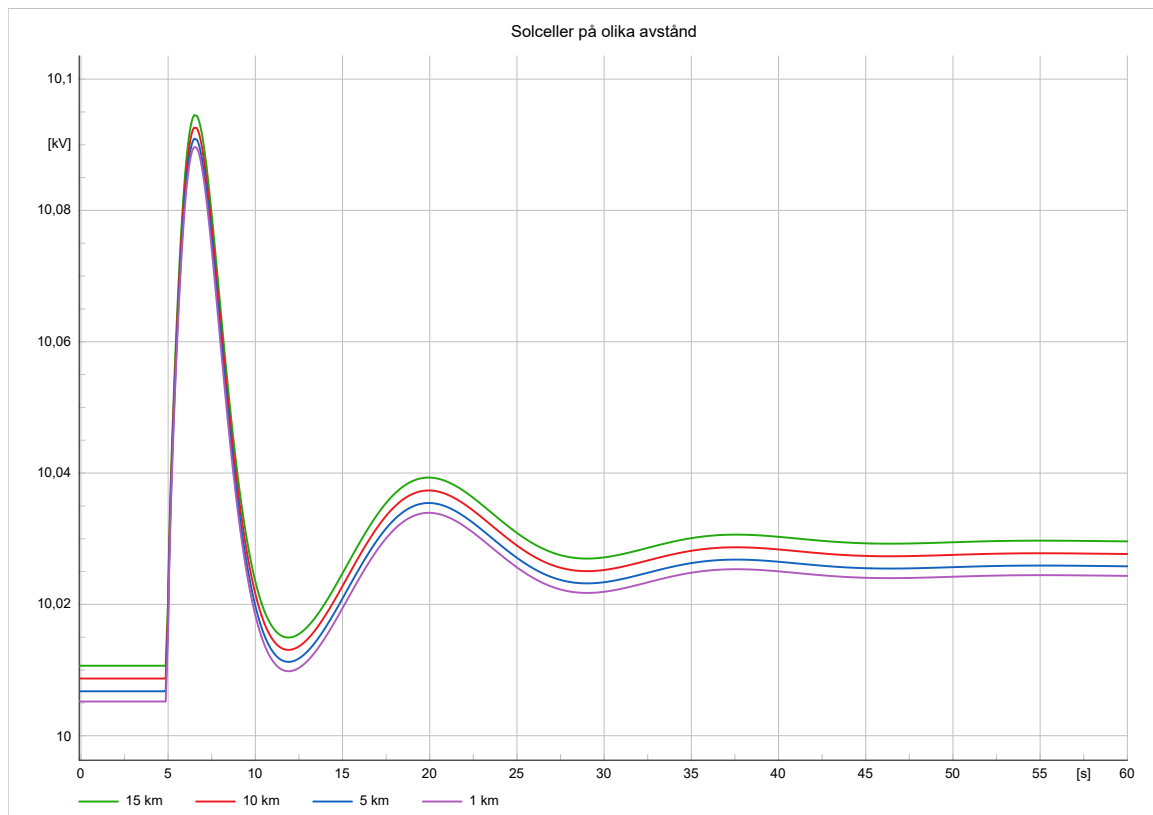
Figur 5.3: Olika producerad effekt från solceller med laster på 20 MW (hög last).

Tabell 5.1: Samanställning scenario 1, producerad effekt från solceller.

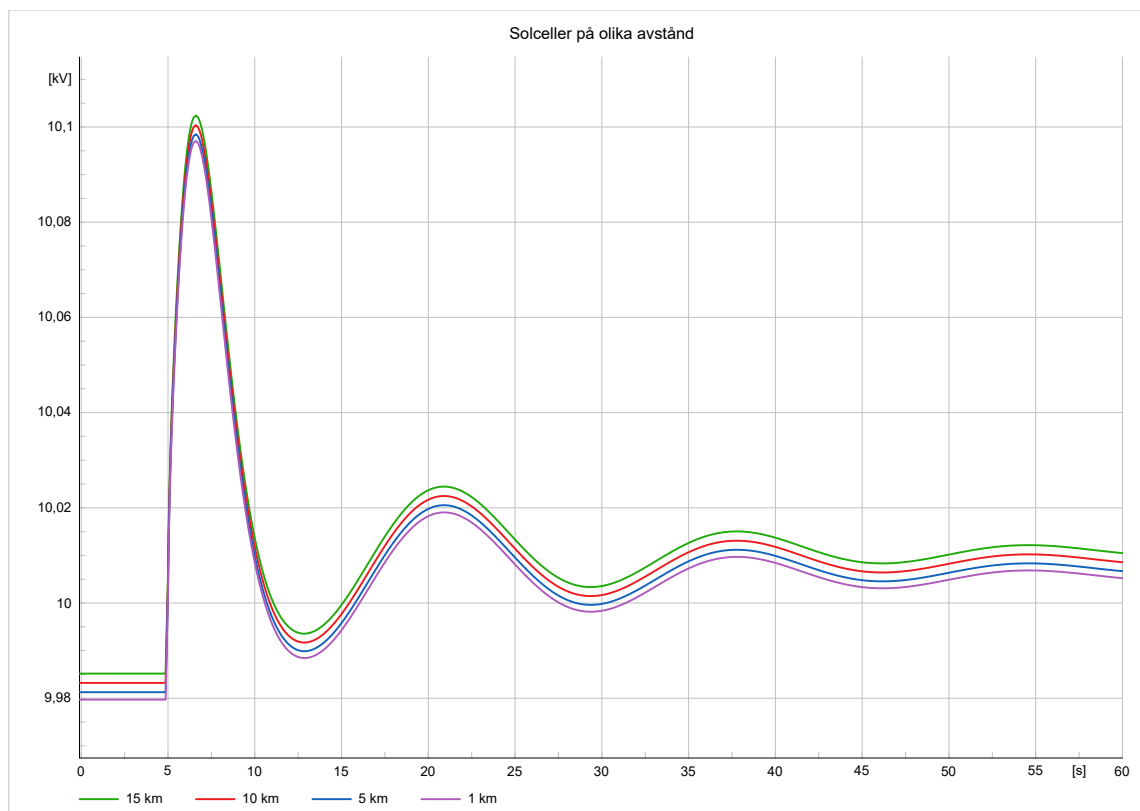
Producerad effekt från solceller [MW]	Spänningens toppvärde [kV]		
	Låg last	Medium last	Hög last
1 (röd)	10,07	10,09	10,1
2 (grön)	10,13	10,17	10,21
3 (blå)	10,18	10,25	10,32
4 (lila)	10,23	10,32	10,43



Figur 5.4: Olika avstånd med laster på 5 MW (låg last). Effekt från solceller på 1 MW.



Figur 5.5: Olika avstånd med laster på 10 MW (medium last). Effekt från solceller på 1 MW.



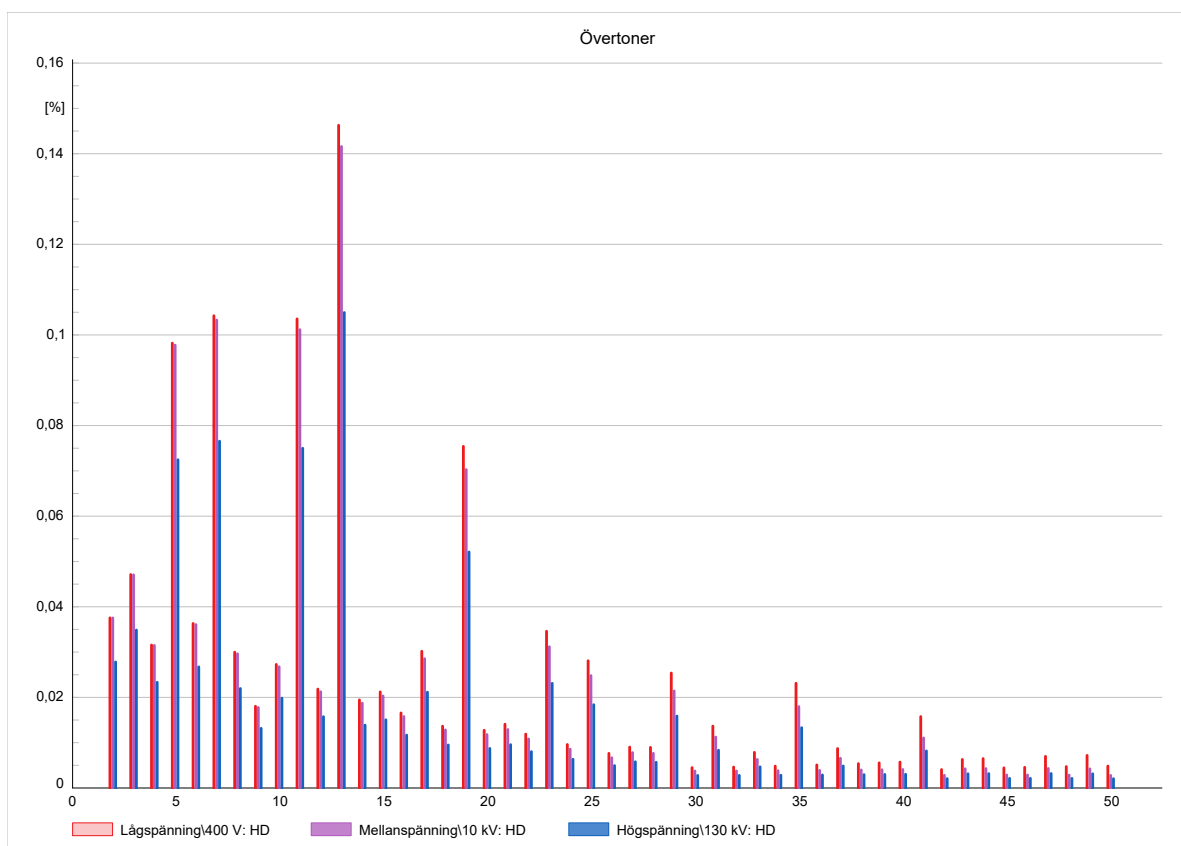
Figur 5.6: Olika avstånd med laster på 20 MW (hög last). Effekt från solceller på 1 MW.

Tabell 5.2: Samanställning scenario 1, avstånd.

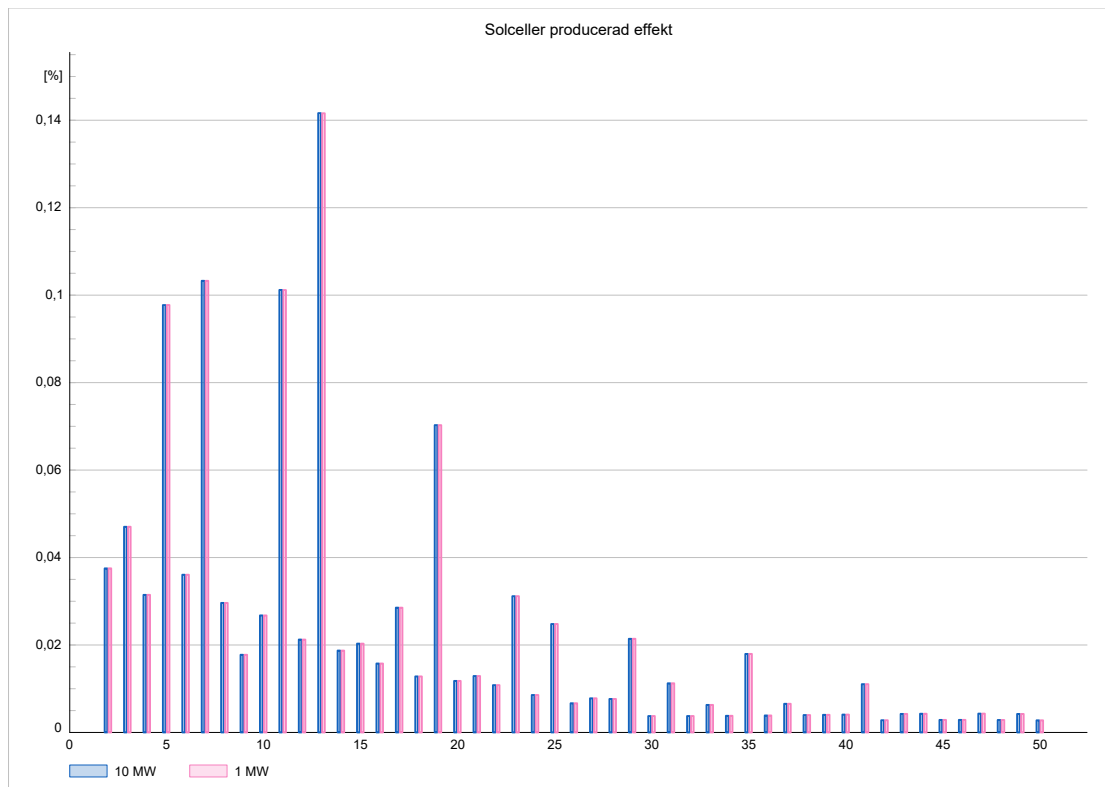
Avstånd mellan solceller och fördelningsstation [km]	Spänningens toppvärde [kV]		
	Låg last	Medium last	Hög last
1 (lila)	10,062	10,086	10,095
5 (blå)	10,062	10,088	10,097
10 (röd)	10,061	10,091	10,099
15 (grön)	10,061	10,089	10,11

5.2 Scenario 2

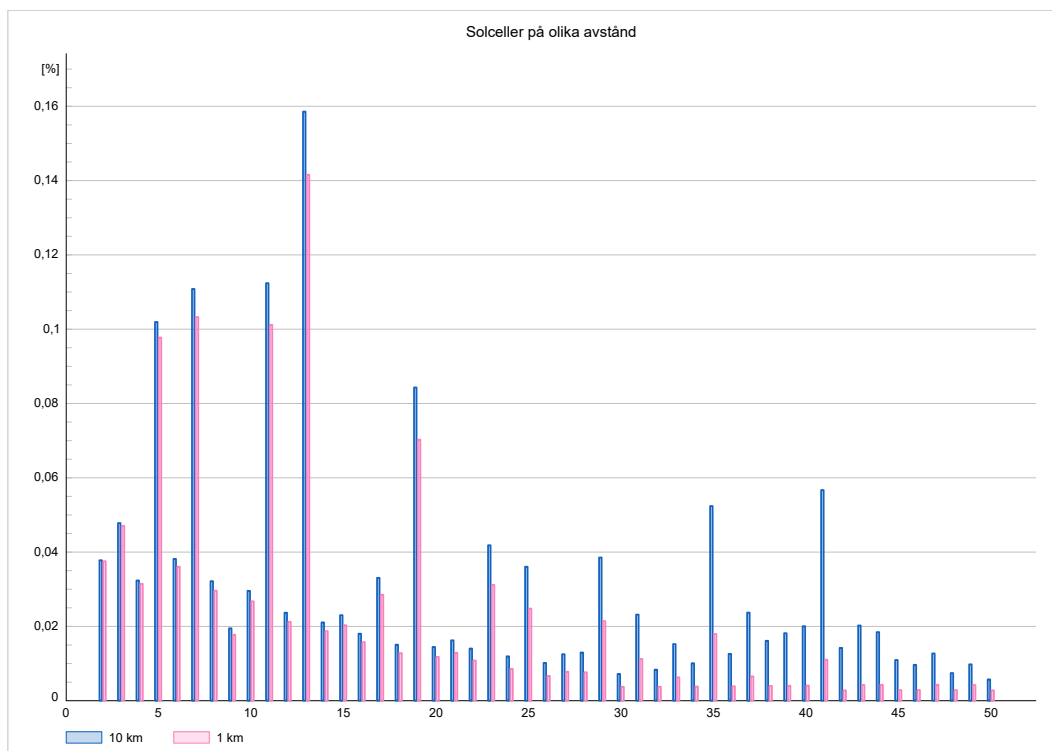
I detta scenario ska spridning av övertoner i elnätet undersökas. Övertonerna orsakas till följd av solceller som ligger nära fördelningsstationen. Nedan jämförs parametrarna: producerad effekt från solcellerna, avstånd från fördelningsstationen och laster. I figurerna 5.7 till 5.10 visas övertonshalten i procent av nominell spänning på y-axeln och på x-axeln syns hela övertoner från 2 till 50.



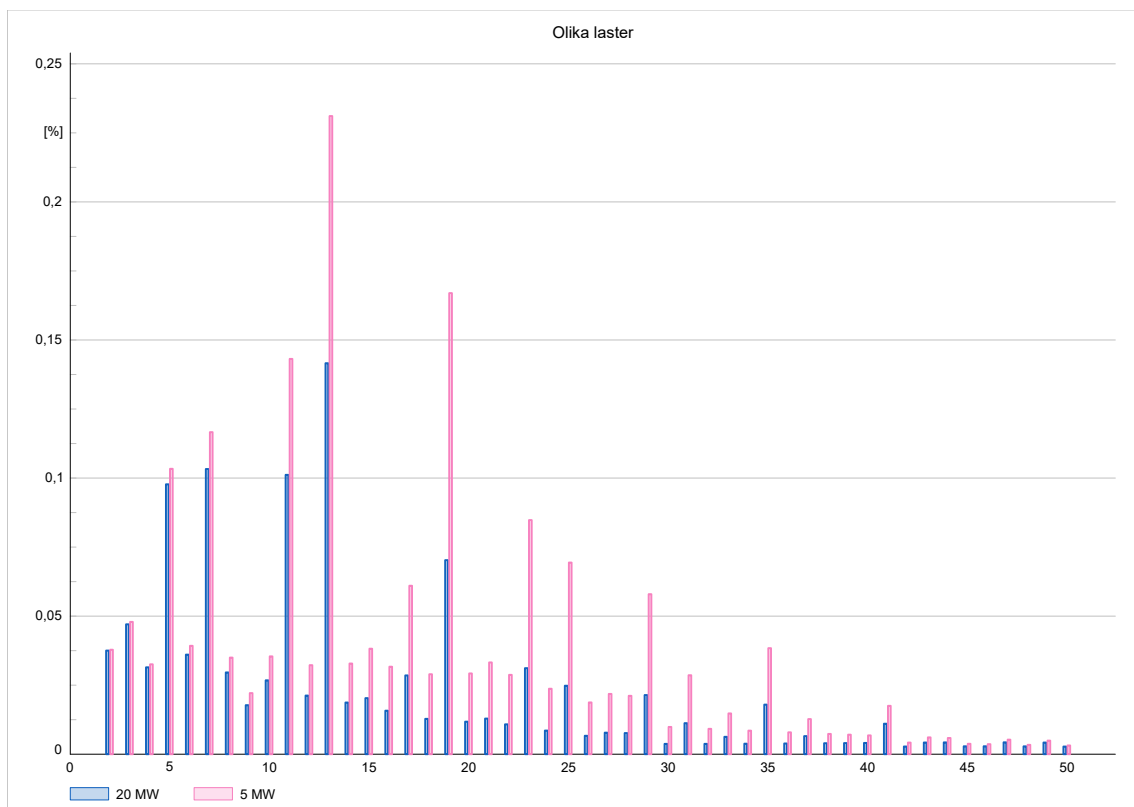
Figur 5.7: Spridning av övertoner i olika delar av elnätet. Effekt från solceller på 1 MW, laster på 10 MW, avstånd på 1 km.



Figur 5.8: Hög jämfört med låg producerad effekt från solceller. Avstånd på 1 km, laster på 10 MW.



Figur 5.9: Långt jämfört med kort avstånd mellan solcellerna och fördelningsstationen. Effekt från solceller på 1 MW, laster på 10 MW.



Figur 5.10: Hög jämfört med låg last från kunder anslutna till stationen. Effekt från solceller på 1 MW, avstånd på 1 km.

Tabell 5.3: Samanställning scenario 2.

Effekt solceller [MW]	THD _u [%]	Avstånd [km]	THD _u [%]	Last [MW]	THD _u [%]
1 (rosa)	1,144	1 (rosa)	1,223	5 (rosa)	1,983
10 (blå)	1,144	10 (blå)	1,575	20 (blå)	1,247

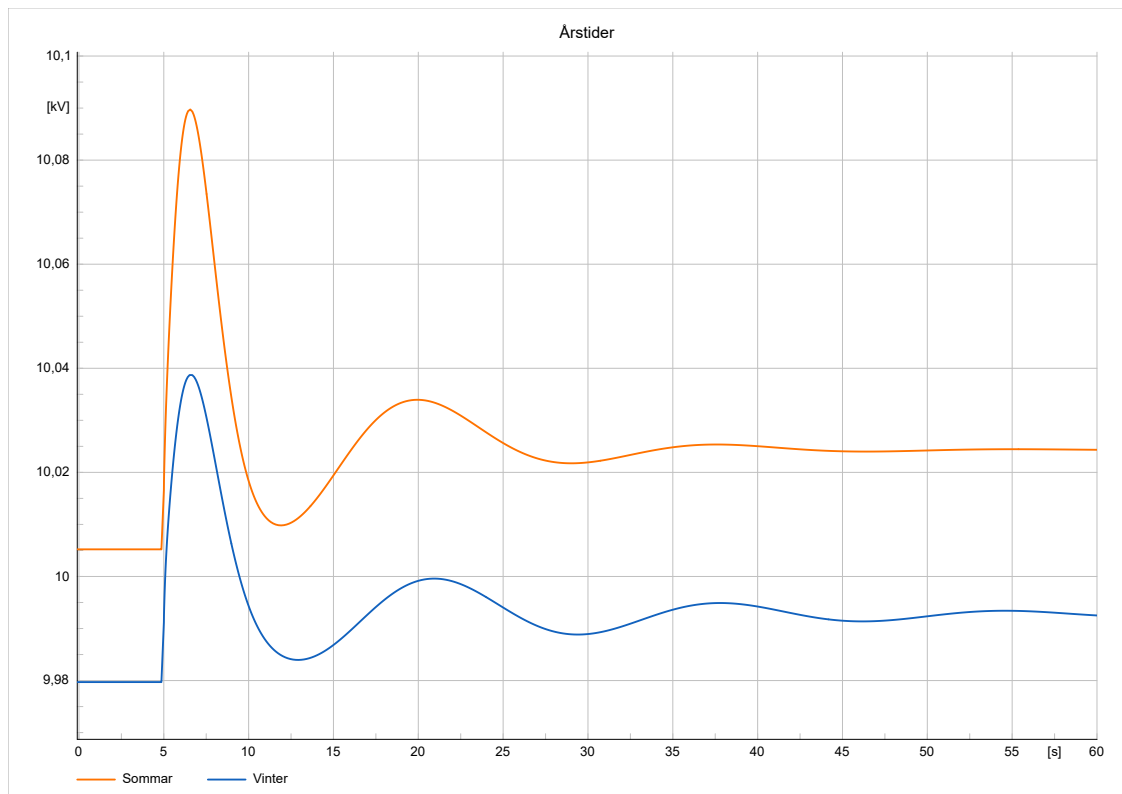
5.3 Scenario 3

Ett extra scenario har gjorts för att undersöka hur elkvaliteten påverkas under sommaren jämfört med vintern. I tabellen nedan görs antagandet att effekten som solcellerna producerar under sommaren, halveras under vintern. Tvärt om gäller för lasten, lasterna är dubbelt så stor på vintern jämfört med sommaren.

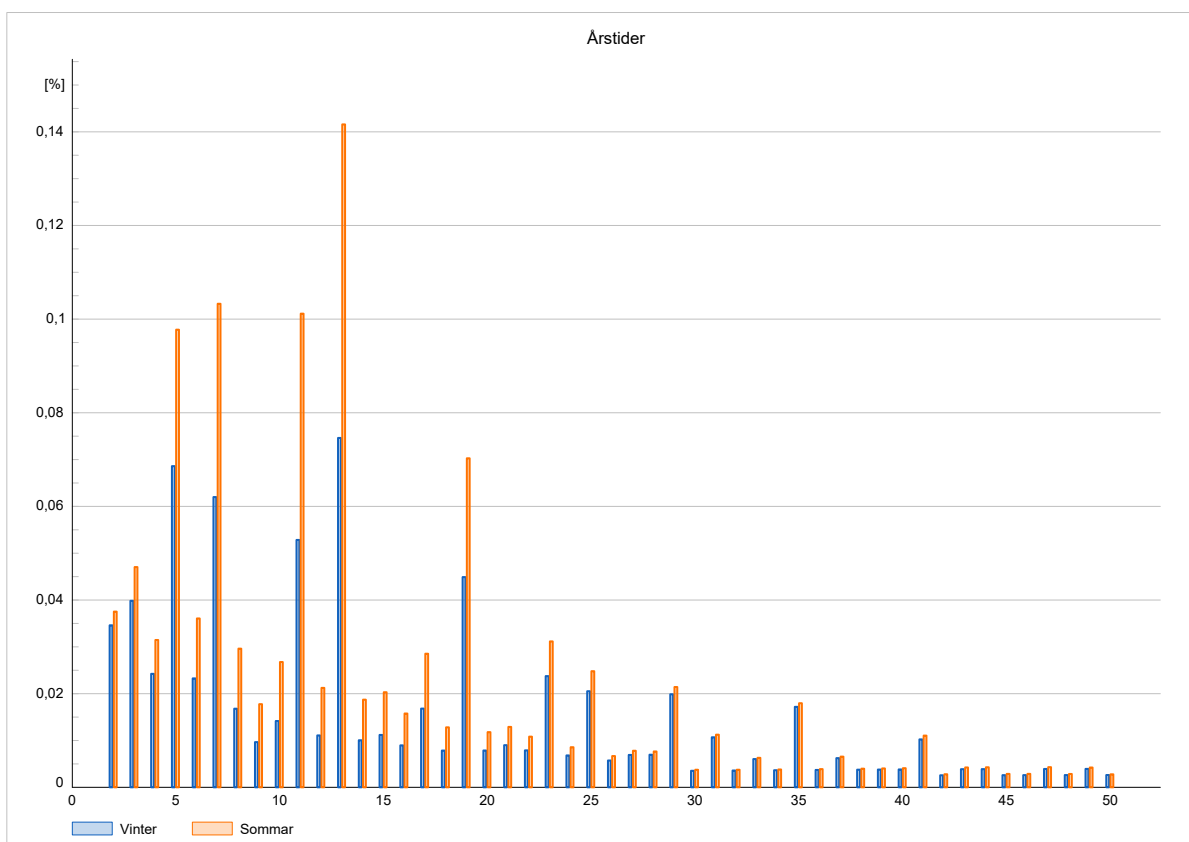
Tabell 5.4: Olika parametrar för sommar och vinter

Årstid	Parametrar		
	Effekt från solceller	Last	Avstånd från solceller
Sommar	$P_{solceller} = 1\text{ MW}$	$\frac{P_{last}}{2} = 10\text{ MW}$	1 km
Vinter	$\frac{P_{solceller}}{2} = 0.5\text{ MW}$	$P_{last} = 20\text{ MW}$	1 km

I figur 5.11 och 5.12 nedan visas simuleringar för spänningsvariationer och övertoner där parametrarna från tabell 5.4 har använts. Den blå färgen representerar vinter och den orangea färgen representerar sommar.



Figur 5.11: Spänningshöjning under sommar och vinter.



Figur 5.12: Generering av övertoner under sommar och vinter.

5.4 Sammanställning av resultat

I detta avsnitt förklaras hur analysen kring resultaten sker. Resultaten diskuteras djupare i nästa avsnitt, tillsammans med resultaten från hela studien.

Tabell 5.5: Sammanställning av simuleringsresultat. Kolumnerna svarar på frågan: Har parametrarna en påverkan för spänningsvariationer respektive övertoner?

Parametrar	Störningsorsak	
	Spänningsvariationer	Övertoner
Producerad effekt från solceller	Ja	Nej
Avstånd från solceller	Nej	Ja
Laster	Ja	Ja

I tabell 5.5 syns en översiktlig sammanställning av resultaten. Simuleringarna och förändring av de olika parametrarna har jämfört. I de två kolumnerna under störningsorsak framgår det hur förändringar i de olika parametrarna har påverkat spänningsvariationer respektive övertoner.

Framtagandet av resultaten har gjorts genom att bedöma hur modellen beter sig för förändrade förutsättningar. I simuleringarna jämförs olika fall då parametrarna i tabellen ändras. Simuleringsfallen jämförs alltså med varandra, denna typ av analys kallas för en känslighetsanalys. I simuleringarna har inget exakt mellanspänningsnät med tillhörande lågspänningsnät använts, därför kan detta arbete inte ta fram exakta nivåer för när problem uppstår, men en känslighetsanalys kan ge en fingervisning om vilka parametrar som är viktigast för nätägare att ta i beaktning vid en förfrågan om inkoppling av en solcellspark.

Den första parametern som jämförs är producerad effekt från solceller. I denna simulering har effekten varierat med olika värden för att se dess påverkan på spänningen och övertoner. Det visades att detta har betydelse för hur spänningen

varieras, se figur 5.1 till 5.3, samt tabell 5.1. Däremot bidrog det inte med någon större förändring kring genereringen av övertoner, se figur 5.8, samt tabell 5.3.

Den andra parametern avser avståndet från solcellerna, det innebär att olika avstånd har simulerats och jämförts mot varandra. Det är kabeln mellan solparken och fördelningsstationen som har varierats. Det sker inte någon förändring i storleken på spänningsvariationen till följd av detta, se figur 5.4 till 5.6, samt tabell 5.2. En viktig detalj som bör läggas märke till i dessa tre grafer är att spänningen börjar på olika nivåer även fast mätningarna görs på 10 kV skenan ansluten till fördelningsstationen. Detta beror på kapacitansen som finns i kablarna. I figur 3.1 på simuleringsmodellen syns det en kabel från solparken till 10 kV skenan. Ju längre denna kabel är, desto högre kommer kapacitansen vara. Kapacitansen mellan faserna i en kabel påverkar fasvridningen av strömmen i mellanspänningsnätet olika mycket beroende på kabelns längd, oavsett om det går ström i kabeln eller inte. Ju högre kapacitans, desto högre spänning. Trots skillnaden under de första fem sekunderna, kan det avläsas från graferna att det inte sker någon stor förändring om avståndet ökar, oberoende av laster. Det skiljer sig från övertoner, där avståndet har betydelse för utbredning av övertoner, se figur 5.9, samt tabell 5.3.

Den tredje och sista parametern som undersökts är hur variationen av laster i nätet påverkar elkvaliteten. För både spänningsvariationer och övertoner är detta en parameter som påverkar resultaten. Det syns i alla figurer för spänningsvariationer, då lasterna har varierats i alla grafer. För utbredning av övertoner, se figur 5.10.

I scenario 3 jämförs hur spänningsvariationer och övertoner påverkas under sommaren respektive vintern. På sommaren är det högre produktion medan mindre laster, tvärt om på vintern. Från graferna kan det avläsas att det finns en skillnad i både hur spänningen och övertonshalten varierar under årstiderna. I figur 5.11 når spänningen under sommaren ett högre värde. Det har dels att göra med att spänningsnivån startar vid ett högre värde. Under vintern drar lasterna mer effekt, det är på grund av detta spänningen har ett längre värde. Det kan avläsas från grafen att spänningens amplitud under sommaren är större än under vintern. Enligt figur 5.12 är även övertonshalten högre under sommaren jämfört med vintern. Det är också på grund av lasterna, då det i scenario 2 framgick att övertonshalten påverkas mycket av lasterna. Under sommaren är lasterna lägre, vilket enligt figur 5.10 också stämmer.

6. Diskussion

Elkvalitet består i de svenska definitionerna av leverans kvalitet och spänningskvalitet, leveranskvaliteten ska vara god och avbrotten ska inte vara för långa. Det finns regler som styr hur elnätsbolagen måste bygga sitt elnät och hur många fördelningsstationer som behövs för att det inte ska bli för långa avbrott. Det är viktigt att spänningen hålls inom tillåtna gränser i fördelningsstationen, då det annars kan påverka hushåll som den matar. Lindningskopplare kan gå söder, då kan det bli för hög spänning i nätet. Det ska finnas marginaler i nätet för att tåla dessa variationer. Elkvaliteten gäller inte endast mellanspänningsnätet, den ska vara god på alla spänningsnivåer; hög-, mellan- och lågspänning. Elkvaliteten påverkas både av produktionen och konsumtionen, eftersom variabel elproduktion är väderberoende och belastningen på nätet varierar över årstider. Elkvaliteten i sin helhet beror alltså på samverkan mellan konsumtion och produktion.

Det finns lösningar som industrier kan tillämpa för att elmaskinerna ska ha en säker drift, den första lösningen är att dimensionera rätt. Dimensioneras anläggningen rätt för att stå emot störningar så sker det mindre avbrott. Detta är ofta en kostnadsfråga hos industrierna, då en maskin som kan stå emot mer störningar ofta också kostar mer. Det är en fråga industrierna får överväga, vad som är värt att lägga pengar på. Är det värt att lägga extra pengar för att en maskin ska kunna köras driftsäkert under en längre tid utan störningar? Den andra lösningen är att dimensionera reläskyddet för att lösas ut snabbare, och på så sätt märka av störningarna snabbare så att eventuella brister i elkvalitet inte hinner skada utrustning. Det finns alltså två vägar att gå för att förbättra elkvaliteten, den första är att dimensionera utrustning rätt, den andra är att dimensionera elnätet rätt.

Lågspänningsnätet är mest känsligt för bristande elkvalitet, på grund av att det är den svagaste delen av nätet. Ett nät anses som svagt både i form av låg spänningsnivå, men det är även den delen av nätet där flest laster är anslutna. Resultaten visar att simuleringarna med större andel laster ökar spänningen. Trots att lågspänningsnätet är mest känsligt för variationer, är det fortfarande viktigt att det inte sker stora variationer längre upp i nätet, då det kan få stora konsekvenser längre ner i nätet. Ju högre upp i nätet, desto mindre variationer bör ske.

Fördelningsstationer, precis som andra stationer i elnätet, är dimensionerade för att transformera ner från en spänningsnivå till en annan. På sommaren är konsumtionen låg samtidigt som produktionen från solceller är hög. Solceller kopplade till lågspänningssidan, kan leda till att de producerar mer effekt än vad lasterna konsumerar. Det kan leda till ett bakvänt effektförflöde genom transformatorn. Bakvända effektförflöden skulle också kunna ske i fördelningsstationer, men spänningsregleringen kan då behövas byggas om. Det finns fack som redan har börjat vända och mata åt andra hållet. Det är en sådan sak som måste finnas i åtanke, att hinna bygga om de stationerna där detta skulle kunna ske så att de ska klara av att mata i båda riktningarna. Det är inte alla fördelningsstationer som klarar av det idag. Det är till exempel viktigt att se till att skyddet klara av att bryta när elen går bakvänt.

Det många nätägare tänker är att reläskyddet ska klara av att ta hand om alla störningar och variationer som sker på elnätet. Det stämmer att utan reläskyddet hade många apparater anslutna till nätet riskerat att gå sönder på grund av den höga spänning de då kan råka ut för. I takt med att förnybar energi blir vanligare och nya stora solparker byggs kan inte all störning från dessa tas hand om i reläskyddet. Exempelvis kan höga frekvenser påverka reläskyddet. Elnätet kommer behöva dimensioneras för att matcha upptrappningen av den variabla elproduktionen.

Resultaten visar att övertoner som genereras från solcellernas växelriktare inte är skadliga för fördelningsstationen i normala förhållanden. Det finns fall som kan uppstå då delta-lindningen i en nätstation kan bli överbelastad på grund av 3e övertonen. Detta är inget som påverkar fördelningsstationen. Utifrån figur 5.7 visas även att förekomsten av 5e och 7e övertonen är mer dominerande i mellanspänningsnätet jämfört med lågspänningsnätet. I denna studie är inte enskilda övertoner relevanta, utan hur övertonshalten förändras genom olika simuleringsfall. Ur resultaten som helhet kan det läsas av att det i lågspänningsnätet förekommer mest övertoner, det beror på att dessa dämpas ju längre upp i nätet de färdas.

I avsnitt 2.3 nämnes det att variationen över fördelningsstationen inte får variera mer än $\pm 1\%$. Det går inte att säga helt säkert att det är just 1% då det finns andra faktorer som påverkar variationerna som sker. Om det inte finns produktion längre ut i nätet kommer det finnas mer marginal för variationer i fördelningsstationen. På grund av att lasterna drar effekt i noder längre ner i nätet. Det går ej att endast kolla på variationer i

spänningen i en viss punkt eftersom det går hand i hand med effekten som lasterna drar. Resultaten från intervjuer tyder på att spänningsvariationerna orsakade av variabel elproduktion inte är skadligt för fördelningsstationer, de menar att lindningskopplare bör hinna med dessa förändringar. Däremot har det fortfarande en påverkan på stationer, även fast det inte är direkt skadligt för komponenter. Det är något som bör tas hänsyn till då större solparksanläggningar blir vanligare. Resultaten från simuleringarna visar att större solparker på en effekt runt 3–4 MW kan överstiga spänningsvariationer på $\pm 1\%$. Som nämdes tidigare går det inte att endast ta effekten från solcellerna i beaktning, det är många olika parametrar som tillsammans påverkar spänningen.

Effekten solcellerna producerar är högre under sommaren jämfört med vintern, eftersom solen lyser starkare. Dessa faktorer påverkar både spänningen och övertonshalten. Skillnaden hos parametrar mellan sommaren och vintern är viktig att lägga märke till när nya solparksanläggningar byggs, eftersom det kan ske större variationer i spänningen under sommaren än under vintern.

Batterilagringssystem är en viktig del av att uppnå ett energisamhälle som alltid har tillgång till pålitlig, billig och ren el. Batterilagring spelar en stor roll för att göra förnybar energi mer användbar, speciellt eftersom sol och vindkraft är beroende av vädret och inte alltid kan leverera el när det behövs. Men med hjälp av BESS kan energi sparas som produceras när det är låg efterfrågan och senare använda det när det är högre efterfrågan. Det ger möjligheter till stabilisering av elnätet genom tjänster som frekvensreglering och peak-shaving. Dessa tjänster kan hantera snabba förändringar i elförbrukningen och göra det möjligt att matcha utbudet med efterfrågan. Då resultaten visar att nätets belastning har påverkan på både spänningen och övertonshalten är detta en viktig faktor att hålla inom rätt gränser. Elförbrukning innebär just hur stora lasterna är, alltså hur mycket el som förbrukas av kunderna. När lasterna ökar på vintern, kan batterier stödja elnätet och på så sätt stabilisera förbrukningen. Den producerade effekten från variabel elproduktion kan också jämnas ut med batterier, det kan användas på båda hållen. Detta skulle kunna hjälpa till vid fördelningsstationer där man ser att riskerna med en inkopplad variabel elproduktionsanläggning är större.

7. Slutsats

De simulerade resultaten visar att spänningsvariationer beror på flera faktorer och parametrar i elnätet. Framför allt har nätets belastning och den producerade effekt från solceller störst betydelse för hur spänningen påverkas.

Övertonshalten påverkas också av olika faktorer, där avståndet till solcellsparken och belastningen i nätet har störst påverkan. Detta innebär att övertonernas spridning i nätet påverkas mer av solcellernas placering än av mängden producerad effekt. Till skillnad från spänningsvariationer, där det är den producerade effekten som har störst påverkan oavsett placering. Effekten hos kunderna påverkar både spänningsvariationer och övertoner.

Dessa faktorer sammanfattas i begreppet nätstyrka: ett nät med många kunder och låg kortslutningseffekt är mest känslig för påverkan. Detta bekräftas av simuleringarna, där både spänningsvariationer och övertonshalt påverkas av konsumtionen i nätet.

Transienter och flimmer är inget som orsakas av solceller. Transienter kan exempelvis uppstå vid åsknedslag som skapar kraftiga, kortvariga spänningsspikar. Flimmer orsakas främst av tunga, ojämna laster såsom gjuterier och ljusbågsugnar. Vindkraftverk kan också ge upphov till flimmer, men solceller har inte denna effekt.

Energilagringssystem kan användas för att hjälpa elnätet att hållas stabilt och inom tillåtna gränser. Vilket kommer vara viktigt i framtiden i takt med att mer variabel elproduktion ansluts till nätet. Det kan stödja nätet både vid tillförsel av el och reglera elförbrukningen.

Sammanfattningsvis är det elkvalitetsparametrarna spänningsvariationer och övertoner som påverkar fördelningsstationer vid anslutning av solcellsparker, medan transienter och flimmer inte orsakas av solceller utan av andra typer av störkällor. Resultaten visar vilka parametrar som är viktigast att tänka på för nätägaren när en ny solcellsanläggning ska byggas, för att inte elkvaliteten vid fördelningsstationen ska drabbas. Rapporten beskriver även vikten av att anpassa nätets utformning och förstärka det för att klara framtidens ökade andel variabel produktion.

8. Framtida studier

En relativt ny elkvalitetsparameter som uppkommer för högre frekvenser kallas supratoner. De kommer kräva mer forskning i framtiden på grund av ökningen av kraftelektronik i utrustningar som solceller och elbilsaddare. Det finns inte heller regler kring dessa i standarder. Supratoner sprider sig från lågspänningsnätet upp till mellanspänningsnätet, vilket orsakar problem med värme.

Modellen som har använts för simuleringarna hade kunnat förbättras och representera ett verkligt och starkare nät. Då hade resultaten kunnat användas i större utsträckning än en känslighetsanalys. Det hade då gått att kolla på enstaka värden och dra slutsatser utifrån det.

Om mer tid hade funnits kunde det gjorts en simulering som även inkluderade batterier. För att visa hur spänningen hade kunnat stabiliseras när solcellerna producerar mycket effekt.

9. Referenser

- [1] Boverket. (2023). *Elnätets uppbyggnad*. Tillgänglig på:
<https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/planering/oversiktsplan/allmannaintressen/struktur/elnat/uppbyggnad/#:~:text=Sveriges%20elnät%20kan%20indelas%20i,både%20luftledning%20och%20nedgrävda%20markledningar> (Åtkomst: 20 januari 2025).
- [2] Vattenfall. (2024). *Vad är egentligen god elkvalitet?* Tillgänglig på:
<https://energyplaza.vattenfall.se/blogg/vad-ar-egentligen-god-elkvalitet> (Åtkomst: 20 januari 2025).
- [3] Elsäkerhetsverket. (2020). *EMC och elkvalitet*. Tillgänglig på:
<https://www.elsakerhetsverket.se/om-oss/vi-arbetar-med/EMC/EMC-och-elkvalitet/> (Åtkomst: 20 januari 2025).
- [4] ABB. (2025). *Energilager – så funkar det*. Tillgänglig på:
<https://new.abb.com/se/om-abb/teknik/sa-funkar-det/energilager> (Åtkomst: 20 januari 2025).
- [5] Rönnlund, M. (2025). *Ämnesförslag inför examensarbete Sweco*. (Åtkomst: 17 januari 2025).
- [6] Vattenfall. (2025). *Elnätets uppbyggnad*. Tillgänglig på:
<https://www.vattenfalleldistribution.se/om-elnatet/elnatets-uppbyggnad/> (Åtkomst: 2 februari 2025).
- [7] Svenska Kraftnät. (2024). *Sveriges elnät*. Tillgänglig på: <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/oversikt-av-kraftsystemet/sveriges-elnat/> (Åtkomst: 2 februari 2025).
- [8] Gustavsson, R. (2003). *Praktisk elkvalitet*. (Åtkomst: 20 februari 2025).
- [9] Svenska Kraftnät. (2025). *Elkvalitet*. Tillgänglig på:
<https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-transmissionsnatet/teknik/elkvalitet/> (Åtkomst: 3 februari 2025).
- [10] Alakula, M., Gertmar, L., Samuelsson, O. (2009). *Energiteknik*. (Åtkomst: 15 mars 2025).
- [11] Metrum, (2024). *Om elkvalitet*. Tillgänglig på: <https://metrum.se/om/om-elkvalitet/> (Åtkomst: 25 februari 2025).
- [12] Svensk standard SS-EN 50160, (2020). *Spänningens egenskaper i elnät för allmän distribution*. (Åtkomst: 17 mars 2025).
- [13] Bagge, V. Personlig intervju, *dLab*. (Utfördes: 14 februari 2025).
- [14] Svenska Kraftnät, (2024). *Balansering av kraftsystemet*. Tillgänglig på:
<https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-systemansvaret/balansering-av-kraftsystemet/> (Åtkomst: 9 mars).

- [15] Unipower, (2025). *Om elkvalitet*. Tillgänglig på: <https://www.unipower.se/sv/om-elkvalitet/> (Åtkomst: 11 april 2025).
- [16] Standard EIFS 2023:3, (2023). *Energimarknadsinspektionens föreskrifter och allmänna råd om krav som ska vara uppfyllda för att överföringen av el ska vara av god kvalitet*. Tillgänglig på: <https://ei.se/download/18.214b931418a26108737f2f0/1694668077847/EIFS-2023-3-om-krav-som-ska-vara-uppfyllda-för-att-överföringen-av-el-ska-vara-av-god-kvalitet.pdf> (Åtkomst: 5 februari).
- [17] Eriksson, N. Personlig intervju, E.ON. (Utfördes: 21 mars 2025).
- [18] Energiföretagen, (2020). *Anslutning av elproduktion till lågspänningsnätet – ALP*. (Åtkomst: 26 mars 2025).
- [19] Öhlén, C., Lidström, S., Jacobsson, K. (2016). *Elkraftsystem 2*. (Åtkomst: 18 mars 2025).
- [20] Öhlén, C., Lidström, S., Jacobsson, K. (2016). *Elkraftsystem 1*. (Åtkomst: 5 mars 2025).
- [21] Alfredsson, A., Jacobsson K., Rejminger A., Sinner, B. (1996). *Elmaskiner*. (Åtkomst: 20 mars 2025).
- [22] Svensson, J. (2023). *Krets- och mätteknik, fk - EFET15, Transformatorn*. (Åtkomst: 6 mars).
- [23] Sweab, (2025). *Nollpunktsbildare*. Tillgänglig på: <https://www.sweab.com/nollpunkten/nollpunktsbildare/#:~:text=Genom%20att%20kompensera%20med%20nollpunktsreaktor,400%20V%20uttag%20för%20lokalkraft> (Åtkomst: 7 april 2025).
- [24] Sydsvenskan, (2011). "För stark spänning i Västra hamnen i natt" Tillgänglig på: <https://www.sydsvenskan.se/2011-05-31/for-stark-spanning-i-vastra-hamnen-i-natt/> (Åtkomst: 7 april 2025).
- [25] Solcells Offerter, (2025). *Solceller: Komplet guide inför ditt köp*. Tillgänglig på: <https://www.solcellsoffter.se/solceller-guide/> (Åtkomst: 10 april).
- [26] Naturskyddsföreningen, (2025). *Hur fungerar solceller och solfångare?* Tillgänglig på: <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/hur-fungerar-solceller-och-solfangare/> (Åtkomst: 10 april).
- [27] E.ON, (2025). *Solceller*. Tillgänglig på: <https://www.eon.se/solceller> (Åtkomst: 8 april).
- [28] Vattenfall, (2025). *Solenergi i Sverige och Europa - en ljus framtid trots nordliga breddgrader*. Tillgänglig på: <https://www.vattenfall.se/fokus/solceller/solenergi-i-sverige-och-europa/> (Åtkomst: 8 april 2025).
- [29] Svenska Kraftnät, (2025). *Frekvensstabilitet*. Tillgänglig på: <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-systemansvaret/kraftsystemstabilitet/frekvensstabilitet/> (Åtkomst: 11 april 2025).
- [30] Bjäre Kraft, (2025). *Frekvensreglering med batterier - Hur fungerar det?* Tillgänglig på: <https://www.bjarekraft.se/privat/om-oss/nyheter/frekvensreglering-med-batterier-hur-fungerar-det> (Åtkomst: 11 april 2025).

- [31] Solkraft Sverige, (2024). *Förstå begrepp som stödtjänster, aggregator och arbitrage*. Tillgänglig på: <https://www.solkraftsverige.se/forsta-begrepp-som-stodtjanster-aggregator-och-arbitrage/> (Åtkomst: 11 april 2025).
- [32] Energy Balance, (2025). *Minska elkostnaderna och skapa intäkter med batterilagring*. Tillgänglig på: <https://www.energybalance.se/batterilagring/#:~:text=Genom%20batterilagring%20kan%20ditt%20f%C3%B6retag,dagen%20n%C3%A4r%20elen%20%C3%A4r%20dyrare> (Åtkomst: 11 april 2025).
- [33] Exro, (2025). *Load Shifting: What Is It and How Does It Work?* Tillgänglig på: <https://www.exro.com/industry-insights/load-shifting> (Åtkomst: 11 april 2025).
- [34] Öresundskraft, (2025). *Vårt elnät - Stabilt och prisvärt*. Tillgänglig på: <https://www.oresundskraft.se/privat/elnat/> (Åtkomst: 26 mars 2025).
- [35] dLab, (2024). *The dLab platform*. Tillgänglig på: <https://dlaboratory.com/solution/> (Åtkomst: 14 februari 2025).
- [36] E.ON, (2025). E.ON *Energidistribution AB*. Tillgänglig på: <https://www.eon.se/om-e-on/verksamhetsomraden/elnaet> (Åtkomst: 26 mars 2025).
- [37] Hem, (2025). *Elnät*. Tillgänglig på: <https://www.hem.se/elnat> (Åtkomst: 26 mars 2025).
- [38] Hansson, L. Personlig intervju, *Öresundskraft*. (Utfördes: 26 februari 2025).
- [39] Herrlin, E. Personlig intervju, *Halmstads Energi*. (Utfördes: 19 februari 2025).
- [40] Green Match, (2024). *Hur mycket el producerar solceller per år, månad och dag?* Tillgänglig på: <https://www.greenmatch.se/solceller/solel> (Åtkomst: 23 april 2025).
- [41] Green Match, (2025). *Solcellspaket*. Tillgänglig på: <https://www.greenmatch.se/solceller/offert-solceller/paket> (Åtkomst: 12 maj 2025).

10. Appendix

