

Kraftelektronik i elnätet



Victor Eriksson

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

Effekten av kraftelektronik i elnätet

En simulationsstudie om övertoner i ett regionnät



LUNDS
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Industriell Elektroteknik och Automation

Examensarbete:
Victor Eriksson

© Copyright Victor Eriksson

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Lunds universitet
Lund 2023

Sammanfattning

Samhället står idag inför en omställning till förnyelsebar energi. I den omställningen kommer kraftelektronik ha en central roll för att uppnå målen som ställs. Kraftelektronik är även en källa till övertoner som i sin tur kan orsaka en del problem som energiförluster, nedsatt kvalitet på den el som levereras samt skador eller en förkortad livslängd på komponenter i ett elnät.

Det här examensarbetet undersöker hur en ökad mängd elproduktion kopplad till kraftelektronik påverkar ett simulerat regionnät och huruvida dagens standarder är tillräckliga för att säkerställa en god kvalitet på den levererade elen. Resultaten visar att en ökning av elproduktion kopplad via kraftelektronik inte behöver leda till en ökad andel övertoner i ett elnät. I stället hade placeringen av kraftelektroniken i simuleringsmodellen störst inverkan på halterna av övertoner. Simuleringarna visar att en ökad andel produktion från kraftelektronik ofta kunde ha en motsatt effekt och sänkte halten övertoner i elnätet.

Resultaten från de simuleringar som gjorts pekar på betydelsen av en korrekt implementation av kraftelektronik i elnätet för att undvika onödiga energiförluster och skador på kraftsystemet. Studien belyser också avsaknaden av standarder som inkluderar högre frekvenser för att kontrollera övertoner när de frekvenser på övertoner som primärt genereras av kraftelektronik blir högre.

Nyckelord: Kraftelektronik, övertoner, elkvalitet, förnyelsebar energi, elnät.

Abstract

The society is currently undergoing a transition to renewable energy. In that transition power electronics will play a central role in achieving the specified goals. However, power electronics is also a source of harmonics that can cause problems such as energy losses, reduced power quality as well as damage or a shortened lifespan of components in a power grid.

This thesis investigates how an increased amount of power production from power electronics affect a simulated high voltage power grid and whether current standards is enough to ensure a good power quality on the delivered electricity. The results show how an increase of power produced by power electronics does not necessarily lead to an increase in the harmonic levels. Instead, the placement of power electronics had the biggest effect on harmonic levels. The simulation shows that an increase in the power produced by power electronics often could have the opposite effect and reduce harmonic levels in the power grid.

The results from the simulations points to the importance of a correct implementation of power electronics in the power grid to avoid unnecessary energy losses and damages of the system. The study also highlights the lack of standards that include limits for harmonic levels of higher frequencies when the primary frequencies of harmonics generated by power electronics is rising.

Keywords: power electronics, harmonics, power quality, renewable energy, power grid.

Förord

Jag vill tacka mina handledare, både från Sweco och LTH, som alltid ställt upp och hjälpt mig med de problem och frågor som dykt upp under arbetets gång. Jag vill även tacka gruppen på Sweco som har fått mig att känna mig välkommen.

Terminologi

AC	alternating current.
AFE	active front end.
DC	direct current.
DIgSILENT PowerFactory	ett simuleringsprogram
IGBT	insulated gate bipolar transistor. En sort av transistor.
PWM	pulse width modulation.
RMS	root mean square. Effektivvärdet av en ström eller spänning.
SVK	svenska kraftnät.
THD	total harmonic distortion.
THD _i	total harmonic distortion för ström.
THD _u	total harmonic distortion för spänning.
Maska	Mer än en inmatningspunkt från det överliggande elnätet.

Innehållsförteckning

1 Inledning.....	2
1.1 Bakgrund	2
1.2 Syfte.....	2
1.3 Målformulering	2
1.4 Problemformulering	2
1.5 Motivering	3
1.6 Avgränsning	3
2 Teknisk bakgrund.....	4
2.1 Sveriges elnät	4
2.2 Elkvalitet.....	5
2.3 Övertoner och olinjär last.....	5
2.4 Nätkommuterande omriktare.....	6
2.5 Självkommuterande omriktare	7
2.6 Resonans.....	8
2.7 Fourierserier	8
2.8 Konsekvenser av övertoner	9
2.8.1 Kondensatorer	9
2.8.2 Transformatorer.....	9
2.8.3 Ledare	10
2.8.4 Elektronisk utrustning	10
2.9 Standarder.....	10
2.9.1 SS-EN 50160.....	10
2.9.2 EIFS 2013:1.....	11
3 Metod.....	12
3.1 DIgSILENT PowerFactory	12
3.2 Simuleringsmodell.....	12
3.3 Injektion av övertoner	14
3.4 Scenarion	16
4 Analys.....	18
4.1 Resultat från simulering	18
4.2 Övertonsspektrum	18
5 Resultat	20

5.1 Scenario 1, 25%	20
5.2 Scenario 2, 50%	25
5.3 Scenario 3, 75%	30
5.4 Scenario 4, 100%	34
5.5 Sammanfattning resultat	36
6 Slutsats	38
6.1 Samhällsnyttan	38
6.2 Framtida utvecklingsmöjligheter	38
7 Källförteckning	40

1 Inledning

Energifrågan är något som diskuteras flitigt i dagens samhälle. Speciellt då omställningen till förnyelsebar produktion ska förverkligas, det i kombination med en ökande andel elfordon som ska snabbladdas. Den omställningen ställer vissa krav på elnätet. Den gemensamma nämnaren till den här omställningen är att en stor del av produktion och konsumtion är kopplad via kraftelektronik till elnätet.

När likspänning omvandlas till växelspanning via kraftelektronik uppstår övertoner. Det här examensarbetet behandlar hur elkvaliten (och i synnerhet övertoner) på elnätet påverkas vid en större andel produktion från kraftelektronik, och om det med gällande standarder finns risk att andelen övertoner på elnätet blir för hög.

Undersökningen har genomförts med simulering i DIgSILENT PowerFactory. DIgSILENT PowerFactory är ett simuleringsprogram som ofta används i branschen och har därför använts i det här examensarbetet.

1.1 Bakgrund

Sweco är ett av Sveriges större konsultbolag som verkar i flera olika sektorer, främst inom samhällsuppbyggnad, så som arkitektur, vatten, energi, industri och transportinfrastruktur med flera. Sweco Energy verkar bland annat i uppbyggnaden av elproduktion och underhåll av elnätet. De har därav ett behov att hålla sig uppdaterade på nya tekniker för att fortsatt vara konkurrenskraftiga.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att undersöka hur en ökande del kraftelektronik påverkar övertoner i ett regionnät.

1.3 Målformulering

Examensarbetet ska undersöka hur övertoner påverkar ett regionnät med en ökande andel kraftelektronisk produktion. Det ska göras med hjälp av simulering i DIgSILENT PowerFactory.

1.4 Problemformulering

Frågor som examensarbetet besvarar är följande:

1. Hur påverkas nivån av övertoner i ett regionnät med en större andel kraftelektronik närvarande?

2. Finns det en risk att det blir för mycket övertoner på elnätet med en för hög andel produktion från kraftelektronik?
3. Finns det risk för materialskada med nuvarande standarder?

1.5 Motivering

Det här examensarbetet valdes då batterier och elnätet är ett intresse som vuxit fram under utbildningens gång. När sedan Sweco var intresserade av idén gällande batterilagring i elnätet, gjordes en förstudie till examensarbetet gällande batterilagring hos Sweco. Därefter bestämdes, efter en del bollande, att examensarbetet skulle studera övertoners närvaro i elnätet.

Batterilagring och övrig utrustning som kopplas mot elnätet med kraftelektronik är i en stadigt ökande trend. Kraftelektronik är flexibel och har många användningsområden, men vad kan hända om vi skulle ha ett kraftsystem med en övervägande stor del av produktionen från kraftelektronik? Det kan vara en vinkel som behöver undersökas för att bibehålla en fortsatt bra elkvalitet framöver.

Sweco Energy som konsultbolag livnär sig på den kunskap de kan bidra med till sina kunder. Därav ser Sweco en nytta i att undersöka möjliga framtidsscenarioer och på så vis fortsatt ligga i framkant på sitt område.

1.6 Avgränsning

Examensarbetet innefattar enbart hur övertoner påverkar ett simulerat regionnät på 130 kV och transformatorer från produktionsanläggning till regionnätet.

2 Teknisk bakgrund

2.1 Sveriges elnät

Sveriges elnät är uppdelat i fyra olika områden. I de områdena produceras och förbrukas olika mycket el, där norra Sverige producerar mer än de förbrukar och motsatsen gäller för södra Sverige. Det här leder till att energin oftast behöver överföras från norr till söder.

Elnätet är i sin tur uppbyggd i tre delar, transmissionsnät, distributionsnät och utlandsförbindelser. Transmissionsnätet, se figur 2.1, är den del som överför energi över hela landet, det görs med en spänning på 400–220 kV och förvaltas av svenska kraftnät (SVK). Den höga spänningen är för att minska förluster i överföring av el över långa sträckor.



Figur 2.1, bild över Sveriges transmissionsnät, taget från SVK hemsida.

Distributionsnätet består i sin tur av två delar, regionnät och lokalnät. Regionnätet är anslutet till transmissionsnätet och levererar i sin tur elen till

lokalnäten. Regionnäten ägs oftast av större elnätbolag som Vattenfall, EON och Ellevio och har en spänning på 130 kv. Lokalnäten är den del som levererar elen till de flesta av förbrukare så som företag och hushåll. Lokalnäten har en spänningsnivå på 40 kV och lägre och ägs av flertalet elnätbolag. Utlandsförbindelser är som namnet antyder förbindelserna mellan Sverige och andra länder och kan vara både växel- och likspänningsförbindelser [1].

2.2 Elkvalitet

Med en god elkvalitet avses en störningsfri leverans till kund, med andra ord levereras elen utan avbrott eller störningar. EIFS 2013:1 anger vissa krav som ska vara uppfyllda för att elen ska anses vara av god kvalitet. De delar den behandlar är:

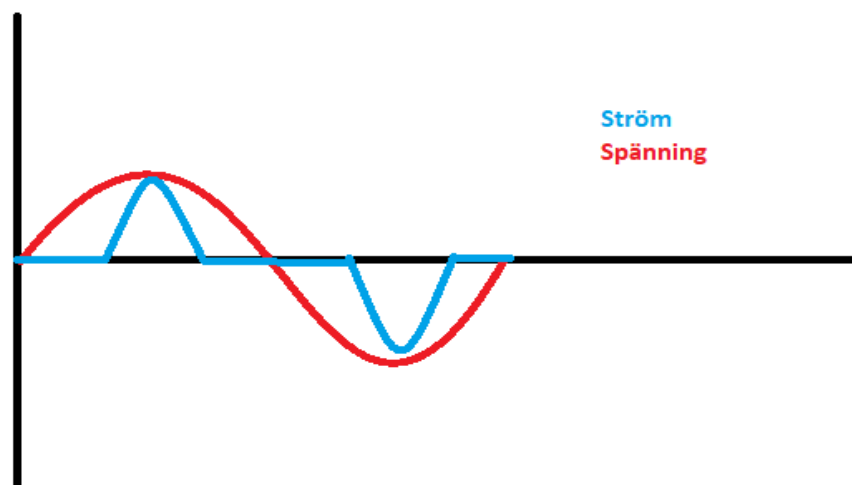
- Funktionskrav
- Trädsäkra ledningar
- Avbrott i elöverföring
- Spänningskvalitet

I avsnittet om spänningskvalitet ingår bland annat spänningsövertoner.

2.3 Övertoner och olinjär last

Övertoner kallas de heltalsmultiplar av grundfrekvensen i elnätet, det vill säga att övertonen av ordningen 2, benämnd H2, har en frekvens på 100Hz i ett 50Hz system.

Övertoner kan delas upp i två olika sorter, strömövertoner och spänningsövertoner. Strömövertoner uppkommer i samband med olinjära laster, det vill säga laster som drar en ström vilket avviker från den sinusformade spänningen, se figur 2.2 för en illustration. Ett exempel på en sådan last är kraftelektronik.



Figur 2.2, en illustration på hur strömkurvan kan se ut för en olinjär last.

Spänningsövertoner uppkommer i sin tur som resultat av strömövertoner. Då den resulterande strömkurvan av den olinjära lasten rör sig genom systemets impedans bildas ett spänningsfall över impedansen enligt Ohms lag. Det spänningsfallet förvränger i sin tur grundtonen och spänningsövertoner bildas [2].

De övertoner som brukar vara av intresse när det kommer till kraftsystem är övertonerna H2-H40 där de lägre övertonerna oftast har en högre amplitud. Andelen övertoner i ett system brukar mätas med THD (total harmonic distortion) som uttrycks i procent och ges av ekvation 1.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \quad (1)$$

Där V_n är RMS värdet av spänningen för den individuella övertonen n , N är den övre gränsen på vilken överton som tas i åtanke, V_1 är RMS värdet av fasspänningens grundton [3].

2.4 Nätkommuterande omriktare

Nätkommuterande omriktare kallas de omriktare som använder sig av dioder eller tyristorer. Likt namnet antyder styrs de av elnätet och leder ström under vissa perioder av sinusvågen. För dioder betyder det att de leder ström under den period som en positiv spänning ligger över dess anslutningspunkter. För tyristorer går det att ställa in en fasvinkel då de börjar leda men ledperiodens avslut sker vid nollgenomgång.

När det kommer till övertoner som avges vid omvandling av DC och AC beror det på antalet pulser som görs av lik/växelriktaren. Där övertonerna uppkommer enligt ekvation 2 för en nätkommuterande omriktare.

$$pk \pm 1 \quad (2)$$

Här är p antalet pulser (oftast 6) och k är ett heltal. Detta innebär att för en 6 puls likriktare är de främst förekommande övertonerna H5, H7, H11 och H13 [3, p.88–89].

Multiplar av 3e övertonen, uppstår främst vid kraftelektroniska enfaslaster. Just multiplar av den 3e övertonen är av nollföljdskaraktär vilket betyder att fasvinkeln är den samma för alla tre faser, vilket har konsekvensen att övertonen summeras i nolledaren. Det har historiskt inneburit en del problem då det kan bidra till att nolledaren blir underdimensionerad för den ström som går genom ledaren och på så vis blir överbelastad. På grund av att multiplar av

3e övertönen summeras i nolledaren kan övertönen inte ta sig genom en dyn-transformator utan den cirkulerar i lindningarna på den D-kopplade sidan och orsakar då värmeproduktion i transformatorn [3, p.153–154].

2.5 Självkommuterande omriktare

Till skillnad från nätkommuterande omriktare använder sig en självkommuterande omriktare, även kallad active front end (AFE), av styrda transistorer som IGBT. Det betyder att i stället för leda när en viss fasvinkel uppnås som görs av tyristorer, kan transistorerna styras elektroniskt med pulsbreddsmodulering (PWM).

När det kommer till vilka övertoner som produceras av en växelriktare med AFE beror det på olika faktorer. Det som primärt avgör i vilka övertoner som avges är switchfrekvensen (som ofta bestäms av en sågtandad bärvåg). För ett bipolärt växlande (det vill säga båda bryggbenen växlas samtidigt för en fas) ges de relevanta övertonerna av ekvation 3 [3, p.124].

$$h = km_f \pm n \quad (3)$$

Här är h är övertönen, m_f förhållandet mellan frekvensen på bärvågen och moduleringsfrekvensen, k och n är heltal. Om k är udda existerar bara övertoner för jämna n och vice versa.

När ett unipolärt växlande används, vilket innebär att varje bryggben kan styras individuellt, gör det att båda benen kan vara anslutna till samma potential samtidigt och ingen spänning läggs ut på lasten. Det här dubblar switchfrekvensen och ändrar då vilka övertoner som är närvarande enligt ekvation 4 [3, p.124], [4].

$$h = k2m_f \pm n \quad (4)$$

Det går att urskilja från ekvation 3 och 4 att en högre switchfrekvens medför att den första övertönen hamnar högre upp i frekvensbandet, men där behöver en avvägning göras i förhållande till de switchförluster som uppkommer som konsekvens av den ökade mängd switchningar som utförs.

Det finns PWM-tekniker som kan, med förutbestämda vinklar för moduleringen, hjälpa till att eliminera redan existerande övertoner i elnätet som är av en lägre ordning som den 5e och 7e övertönen [4], [3, p.123–126]. På liknande vis används AFE som ett aktivt filter och är då inte låst till att filtrera enskilda övertoner som passiva filter är. Ett aktivt filter kan på så vis anpassa sig till vilka övertoner som är närvarande just i det ögonblicket.

2.6 Resonans

Eftersom övertonernas amplitud även beror på impedansen i ett system kan impedansen göra stor skillnad för att ett system ska hålla sig inom tillåtna gränser. Förstärkningen av övertoner uppkommer av både parallell och seriell resonans och oftast då kondensatorer är inblandade.

Parallell resonans resulterar i en hög impedans för resonansfrekvensen. Eftersom de flesta övertonskällor kan antas vara strömkällor bidrar det till ökade spänningsövertoner, resonansfrekvensen för parallell resonans ges av ekvation 5 [3, p.143–144].

$$f_{res} = f \sqrt{\frac{S_s}{S_c}} \quad (5)$$

Där är f_{res} är den parallella resonansfrekvensen, f är grundfrekvensen, S_s är kortslutningsklassning (Var), S_c är kondensatorvärdet (Var).

Seriell resonans till skillnad från parallell presenterar en låg impedans för resonansfrekvensen, Det bidrar till en risk för höga strömmar till kondensatorer för förhållandevis små spänningsövertoner [3, p.144–145].

2.7 Fourierserier

All analys av övertoner utgår ifrån fourierserier. Fourierserien visar att för en periodisk funktion med ett periodtid T kan funktionen summeras med hjälp av sinusformade komponenter, det vill säga att oavsett kurvform kan den delas upp i sinusformade delar. Det kan förklaras matematiskt enligt ekvation 6 [3, p.17–18].

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right) \quad (6)$$

Här är $x(t)$ är en periodisk funktion, a_0 är medelvärde av funktion x , a_n och b_n amplituderna för cosinus- respektive sinus-komponenterna av övertonen n . a_0 ges av att integrera funktionen från $-T/2$ till $T/2$ och därefter dividera med T enligt ekvation 7 (likspänningskomponenten av $x(t)$).

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (7)$$

a_n och b_n ges i sin tur av ekvation 8 respektive ekvation 9 [3, p.18–19].

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (8)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (9)$$

2.8 Konsekvenser av övertoner

Övertoner kan åstadkomma ett antal olika problem beroende på vilken del eller apparat i ett system som utsätts. Sammanfattat är konsekvensen ofta en ökad värmeproduktion, sänkt livslängd på komponenter eller rent av att apparaten slutar fungera som planerat.

2.8.1 Kondensatorer

Kondensatorer är ofta inblandade när det kommer till övertoner, det eftersom de bidrar till att ändra resonansfrekvens. Enligt ekvation 10 går det att urskilja hur strömmen till en kondensator förhåller sig till spänningen för den enskilda övertonen [5].

$$I_n = n(V_n) \quad (10)$$

Där I_n är strömövertonen i procent, n är övertonen och V_n är spänningsövertonen i procent. Det innebär att strömmen till en kondensator kan procentuellt bli stor i förhållande till spänningsövertonen.

2.8.2 Transformatorer

Övertoners påverkan på transformatorer är främst den ökade värmeproduktion som sker som konsekvens av de strömövertoner som flyter genom transformatorn. Delta-kopplade transformatorer kan överbelastas om nollföljdsströmmar inte tas i beaktning. Övertoner kan även orsaka en resonans som uppkommer mellan systemets kapacitans och transformatorns induktans. Övertoner bidrar också till ökade hystereseffekt och större virvelströmmar [3, p.153–154].

Hystereseffekt i transformatorer uppkommer till följd av att transformatorjärnan magnetiseras och avmagnetiseras. Storleken av förlusten bestäms av arean på hystereskurvan vilket bland annat beror på material och frekvens. Då övertoner har en högre frekvens relaterat till vilken ordning de har ökar de relativa hystereseffekt för varje ordning av överton.

Virvelströmmar är ett resultat av Faraday's lag vilket säger att en ändring i magnetfält inducerar en ström. I transformatorn induceras virvelströmmar i kärnan till följd av strömmen som går igenom lindningarna, den resulterande förlusten av virvelströmmar ökar kvadratisk med frekvensen.

Virvelströmmarna ger upphov till värmeproduktion i form av den effekt som produceras när den inducerade strömmen flyter genom resistansen.

2.8.3 Ledare

Den primära konsekvensen för ledare är värmeproduktion.

Värmeproduktionen uppkommer till stor del av strömmens ökade RMS värde, men värmeutvecklingen är också en konsekvens av strömfördelningen i ledaren, strömfördelningen i en ledare ändras genom strömförträngning och närhetsverkan. Både strömförträngning och närhetsverkan är beroende av frekvensen [3, p.153–154].

Strömförträngning gör att strömmen koncentreras kring ledarens yttre skikt och på så vis ökar den effektiva resistansen i ledaren. Det sker då magnetfältet som produceras av strömmen i ledaren ger upphov till cirkulerande virvelströmmar vilket producerar ett magnetfält i motsatt riktning i kärnan av ledaren. Det magnetfält ”trycker” i sin tur ut strömmen till det yttre skiktet. Hur framträdande detta fenomen är beror på frekvensen.

Närhetsverkan är, likt namnet antyder, hur strömmen skjuts undan från närliggande ledares magnetfält, vilket ger liknande konsekvens som strömförträngning att den effektiva resistansen ökar i ledaren [6].

2.8.4 Elektronisk utrustning

När det kommer till elektronik är det största problemet det ökande antal nollgenomgångar som övertoner kan ge upphov till. Det är vanligt för elektronik att utnyttja när spänningen skiftar tecken (går genom noll) för mätning av tid. När andelen övertoner är större kan elektroniken då ta fel på grundtonen så dess tidsräkning slutar fungera [5].

2.9 Standarder

2.9.1 SS-EN 50160

SS-EN 50160 är en svensk standard som behandlar spänningens egenskaper i elnät för allmän distribution. I denna standard ingår då även övertoner i elnätet och gränsvärden för vissa enskilda övertoner. Då denna information intogs var både gränser för vissa enskilda övertoner och den totala övertonshalten under övervägande. För individuella övertoner se tabell 2.1.

Tabell 2.1, indikativa värden på enskilda övertoner i anslutningspunkten. För spänningsvärde över 36kV och under- eller lika med 15kV. Taget från SS-EN 50160 [10].

Udda övertoner				Jämna övertoner	
Icke multipler av 3		Multipler av 3		Ordning h	Relativ spänning (uh)
Ordning h	Relativ spänning (uh)	Ordning h	Relativ spänning (uh)		
5	5%	3	3% ^a	2	1,9%
7	4%	9	1,3%	4	1%
11	3%	15	0,5%	6 ... 24	0,5%

13	2,5%	21	0,5%		
17	-				
19	-				
23	-				
25					
ANM 1 – Inga värden är angivna för övertoner av högre ordning än 25 då dessa vanligtvis är små och i stor utsträckning oförutsägbara till följd av resonansfenomen.					
ANM 2 – Övertoner som är icke multipler av 3 och av högre ordning än 13 är under övervägande.					
ANM 3 – I vissa länder finns redan gränser för övertoner.					
^a Värdet på tredje övertonen beror på nätets uppbyggnad och kan vara betydligt lägre.					

2.9.2 EIFS 2013:1

EIFS 2013:1 är energimarknadsinspektionens föreskrifter och råd vilket behöver vara uppfyllda för att överföring av el ska anses vara av god kvalitet. EIFS 2013:1 behandlar ett antal olika punkter däribland spänningsövertoner. Till skillnad från SS-EN 50160 anger den även ett värde för THD_u . EIFS 2013:1 anger att varje tiominutersvärde i en period på en vecka ska varje enskild överton vara lika eller mindre än värdet i tabell 2.3 och THD_u mindre eller lika med 8%.

Tabell 2.3, värden för individuella övertoner för referensspänningar över 36kV och under eller lika med 150kV. Taget från EIFS 2013:1 [11].

Ej multiplar av 3		Multiplar av 3			
Övertoner (n)	Relativ övertonshalt (%)	Övertoner (n)	Relativ övertonshalt (%)	Övertoner (n)	Relativ övertonshalt (%)
5	5,0%	3	3,0%	2	1,9%
7	4,0%	9	1,3%	4	1,0%
11	3,0%	15	0,5%	6...24	0,5%
13	2,5%	21	0,5%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

3 Metod

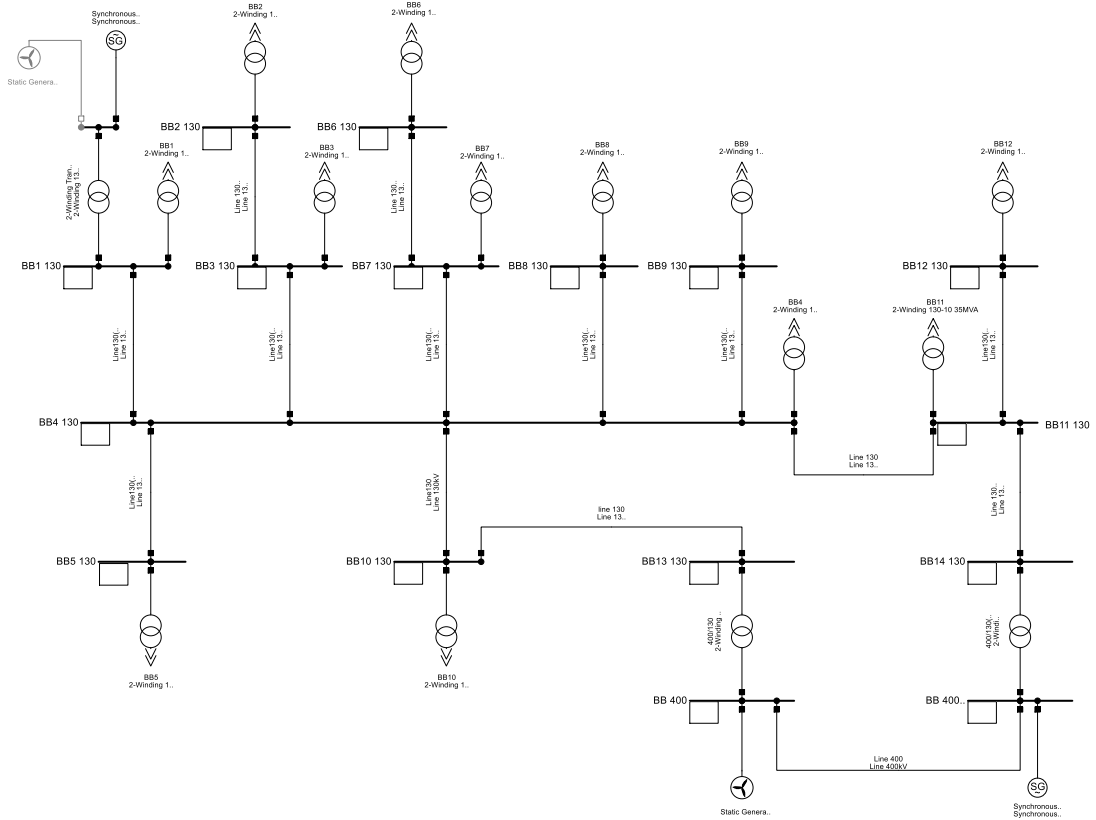
Examensarbetets genomförande har gjorts genom att en simuleringsmodell har framtagits och därefter använts för att besvara de problemformuleringar som formulerats i kap 1.4.

3.1 DIgSILENT PowerFactory

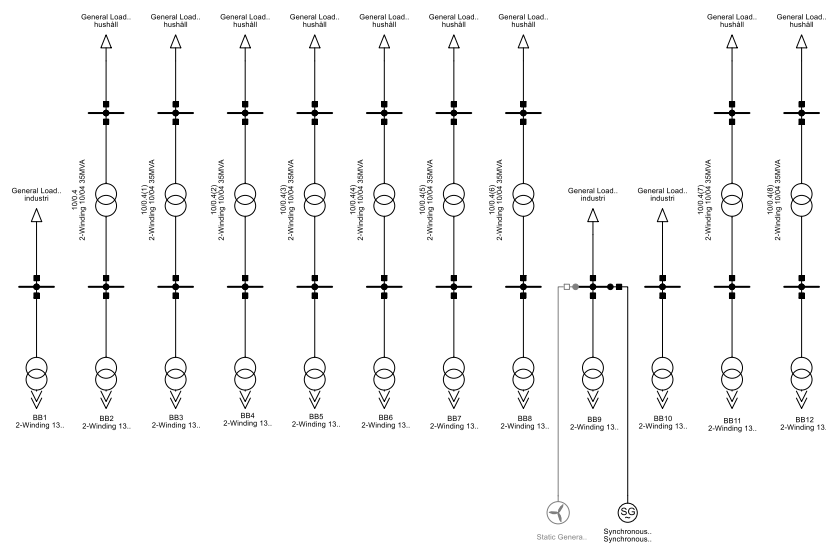
DIgSILENT PowerFactory är ett simuleringsprogram som används för att simulera kraftsystem, inkluderat sådant som transmission, distribution, generatorer och olika laster. Det finns både färdiga moduler att använda för simulering och möjlighet att anpassa element till att motsvara verkliga komponenter man försöker efterlikna. Anledningen till att DIgSILENT PowerFactory (härefter kallat PowerFactory) valts för att göra simuleringen är att det är en mjukvara som ofta används i branschen och är program Sweco använder sig av för sina simuleringar.

3.2 Simuleringsmodell

Modellen är uppritad för att efterlikna ett regionnät i södra Sverige utan att ha kopierats av ett befintligt. I figur 3.1 och 3.2 visas modellen som använts, där ett teoretiskt regionnät, med en maska från transmissionsnätet och med distribution till lokalnäten som är radiell har ritats upp. I figur 3.1 är regionnätet på 130 kV uppritat, med en maska i nedre högra hörnet på 400 kV där den produktion som inte görs i regionnätet matas in. I figur 3.2 är transformatorer och laster inritade, lasterna befinner sig på 10 kV för industri och 0,4 kV för hushåll. För att isolera hur övertoner från elproduktionen påverkar elnätet är alla laster i simuleringsmodellen linjära, det vill säga att de inte är en källa till övertoner.



Figur 3.1, ritning på regionnätet som används som simuleringsmodell. (Se appendix A för större bild).



Figur 3.2, Lågspänningsritning med alla laster. (Se appendix B för större bild).

I figur 3.1 och 3.2 är de tjocka linjerna kopplingskenor som i sin tur alla element som ledningar, transformatorer, laster och generatorer kopplas.

Regionnätet i simuleringen är uppskattningsvis i storleksordning om 1/8 av hela Skåne. Baserat på det är lasterna dimensionerade för att tillsammans utgöra en åttondel av Skånes förbrukning. Information om elförbrukningen är taget från hemsidan regionfakta, där Skånes elförbrukning år 2021 uppgått till 13 055 GWh [7]. Omräknat till momentan last och delat med 8 blir det cirka 186 MW vilket därefter har fördelats på de 12 laster som finns i simuleringen.

Produktionen som inte kommer från 400 kV har räknats ut på likadant vis. Elproduktionen i Skåne år 2021 uppgick till 2 897 470 MWh vilket omräknat till momentan produktion och dividerat med 8 blir cirka 41,345 MW. Anslutningspunkterna för elproduktionen finns på fyra olika ställen i simuleringsmodellen. Två är placerade på 400 kV sidan i det nedre högra hörnet i figur 3.1. Två anslutningspunkter är placerade på 10 kV, en längst upp till vänster i figur 3.1 vilket matar in på BB1, den andra är den 4e från höger i figur 3.2 och kopplas ihop med figur 3.1 vid kopplingskena BB9.

För att få en mer verklig representation över spridningen av övertoner i simuleringsmodellen har alla ledare modellerats av färdiga element från PowerFactory bibliotek. Det har gjorts för att få en verklighetstrogen impedans i kraftsystemet, eftersom impedansen har stor betydelse för utbredningen av övertoner i ett elnät.

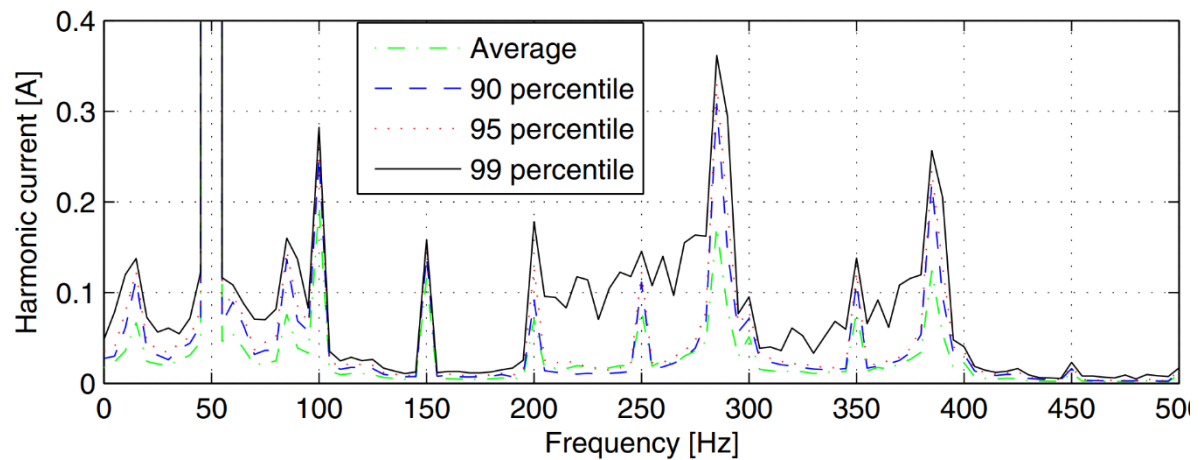
3.3 Injektion av övertoner

Med tanke på den stora mängden apparater som producerar övertoner som är kopplade till elnätet, har vissa förenklingar varit nödvändiga. Det primära syftet med examensarbetet är att undersöka hur övertoner som produceras vid elproduktion kopplad till kraftelektronik påverkar elnätet.

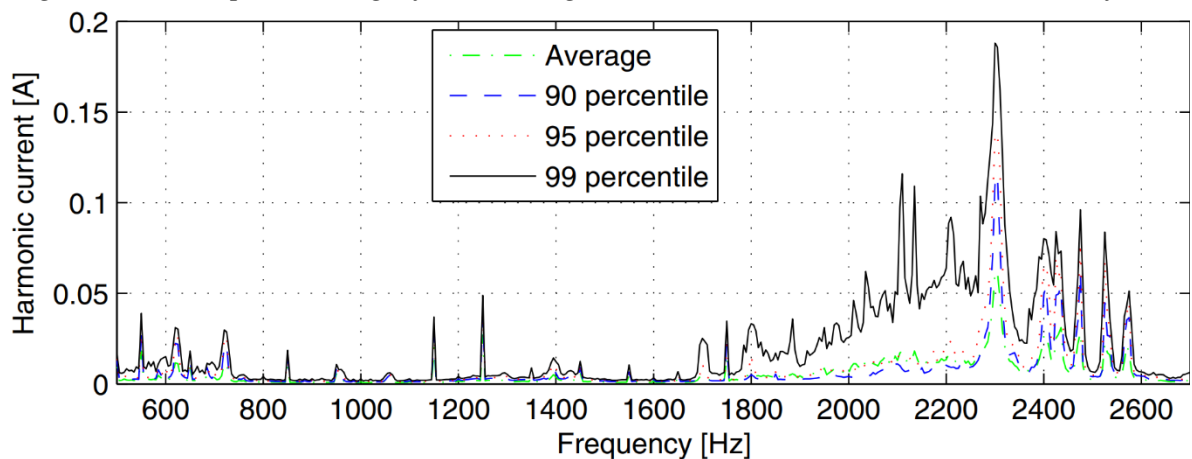
Nyinstallerad produktion i form av exempelvis vindkraftverk och solceller har sin produktion kopplad via styrda transistorer som IGBT. Med andra ord används AFE, och uppbyggnaden av växelriktaren kan i sin tur se olika ut. Transistorbryggorna kan kopplas till vad som kallas flernivåomriktare. Det gör att övertonsspektrumet skiljer sig relativt kraftigt beroende på vilken växelriktare och switchfrekvens som används.

Det strömspektrum som använts i examensarbetet är hämtat från en studie om över- och mellantoner vid ett modernt vindkraftverk i [8]. Strömspektrumet är avläst från figur 3.3 och figur 3.4, som i sin tur lagts in i PowerFactory och

använts i modellen för produktionen som kopplas via kraftelektronik i simuleringsmodellen.



Figur 3.3, strömspektrum taget från [8]. Figuren visar strömövertoner vid ett vindkraftverk



Figur 3.4, strömspektrum taget från [8]. Figuren visar strömövertoner vid ett vindkraftverk

Koncentrationen av övertoner som går att urskilja kring 2300Hz i figur 3.4 konstaterades i [8] att förmodligen härstamma från switchfrekvensen i växelriktaren. Det innebär att multiplar av switchfrekvensen inte var närvarande i övertonsspektrumet och blev därav inte implementerade i simuleringsmodellen. Multiplarna av switchfrekvensen borde ha spelat roll i simuleringsmodellen genom att höja halten övertoner.

Eftersom fasvinklar inte går att läsa av från figur 3.3 och 3.4 så har heller inte fasvinklar angivits i simuleringsmodellen. För att det skulle fungera i PowerFactory behövde övertonerna anges enligt IEC 61000 (IEC 61000 är en internationell standard), när det görs i PowerFactory så summerar PowerFactory alla nollföljdsövertoner angivna enligt IEC 61000 som om de är av positiv fasföljd. Att nollföljdsövertonerna anges som de vore av positiv fasföljd har dock ingen avgörande betydelse i detta examensarbete.

3.4 Scenarion

För att se hur andelen av elproduktion kopplat via kraftelektronik påverkar ett regionnät har ett antal scenarion satts upp. I de scenariona har den procentuella andelen av totala effekten producerad av kraftelektronik ändras och vart i nätet effekten i fråga matas in. Andelen produktion från kraftelektronik har delats upp i 25%, 50%, 75% och 100%, denna el matas i sin tur in antingen helt ifrån 400 kV sidan eller uppdelat så 41,345MW matas in där de synkrongeneratorer är anslutna, vilket sker på 10 kV på två ställen i elnätet, se figur 3.1 och 3.2.

För att göra scenario 4 jämförbart med de tidigare scenarierna, begränsades det scenariot till enbart den andra delen, det vill säga där effektproduktionen fördelas över elnätet. Det här beslutet togs eftersom det annars inte hade varit möjligt att göra en rättvis jämförelse genom att enbart stänga av de synkrongeneratorer som producerade resterande effekt i scenario 1–3.

4 Analys

Användandet av PowerFactory ledde till att mycket tid fick läggas på att lära sig de funktioner och parametrar som krävdes för att rita upp och testa simuleringsmodellen. Det här kapitlet ska motivera de val, problem och resultat som uppstod under examensarbetets gång.

4.1 Resultat från simulering

Resultaten som presenteras i det här examensarbetet är producerade med hjälp av PowerFactory. Resultaten har beräknats i PowerFactory baserat på den information om kraftsystemet som matats in, som exempelvis impedans och längd på kablar och övertonsspektrum från laster och kraftproduktion. Det betyder att det krävs en hel del information för att ge en god representation av ett kraftsystem. Därav går det inte att ta resultaten från det här examensarbetet och dra slutsatser om individuella fall. Resultaten som presenteras bör i stället ses som ett möjligt utfall och en fingervisning av vad som kan ske.

Resultaten presenteras i form av grafer, ritningar och diagram. Alla figurer är genererade i PowerFactory med deras inbyggda funktioner, varefter de har exporterats som .EMF filer.

4.2 Överttonsspektrum

Ett av de stora problem som stöttes på under examensarbetets gång var hur övertoner skulle genereras i simuleringsmodellen. Nyinstallation vid elproduktion med kraftelektronik idag sker främst med så kallade flernivåomriktare. Hur många ”nivåer” som används kan skilja sig, men fler nivåer ger de främst framträdande övertonerna vid en högre frekvens då effekten av en flernivåomriktare är att den uppfattade switchfrekvensen ökar [9].

Då övertonsspektrumet som genereras av omriktare är kopplade till moduleringsmönstret, kan det ha bidragit till att ingen av de företag som kontaktats varit intresserade av att delge det övertonsspektrum som genereras från deras växelriktare.

Det lämnade alternativet att hitta ett redan publicerat övertonsspektrum vilket gjordes i [8]. Rapporten är från 2014 och mätningarna är utförda på en växelriktare med AFE men inte av typen flernivåomriktare. Spektrumet innehöll inte heller övertoner med en frekvens över cirka 2700. I rapporten gjordes antagandet att övertonen H46 och de närliggande är kopplade till switchfrekvensen. Det betyder att multiplar av switchfrekvensen tyvärr inte

kommer med i övertonsspektrumet och således inte heller kan implementeras i simuleringsmodellen.

5 Resultat

De resultat som presenteras i det här kapitlet kommer från 7 individuella simuleringar uppdelat i 4 olika scenarion där skillnaden är vilken effekt av produktionen som kommer ifrån kraftelektronik och vart i kraftsystemet elproduktionen matas in. Stapeldiagram och grafer är tagna ifrån kopplingsskena 4 (kallad BB4 i figur 2).

De rutorna med värden vid varje kopplingsskena anger, i ordning uppifrån och ned:

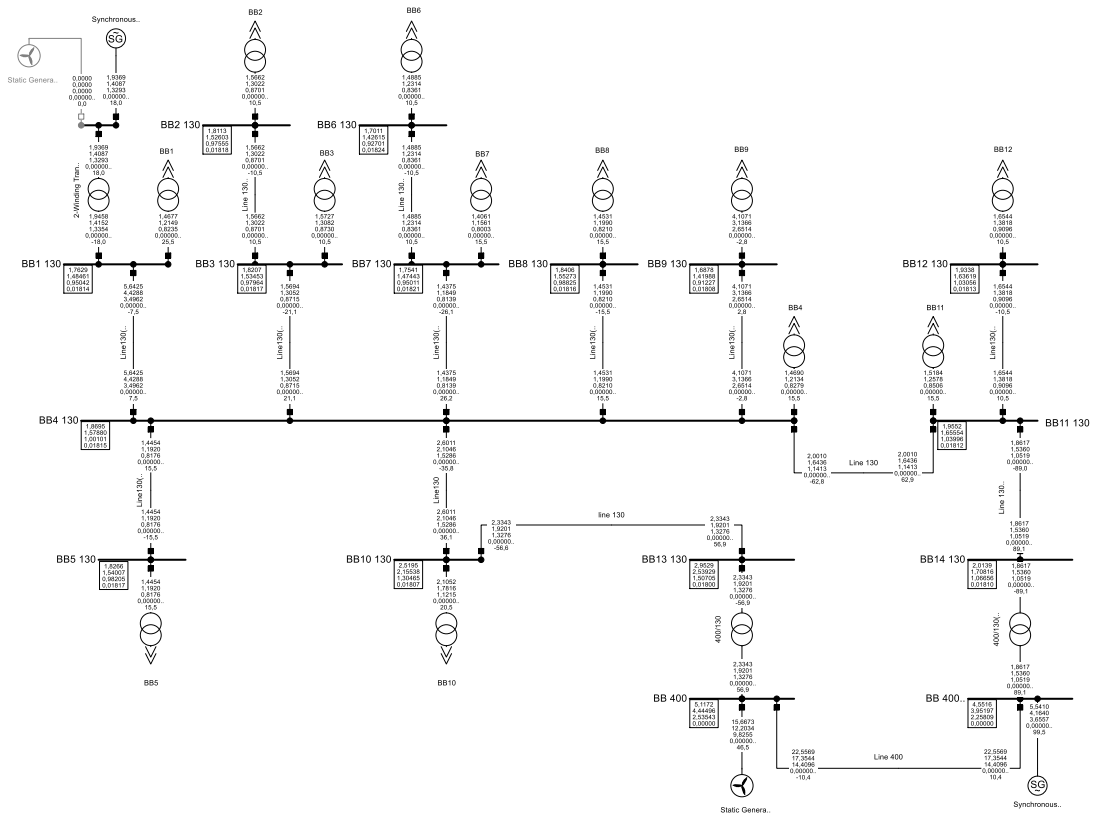
- THD_u för alla fasföljder i % i förhållande till grundtonen.
- THD_u för positiv fasföljd i % i förhållande till grundtonen.
- THD_u för negativ fasföljd i % i förhållande till grundtonen.
- THD_u för nollföljd i % i förhållande till grundtonen.

De rutorna med värden vid varje ledning anger, i ordning uppifrån och ned:

- THD_l för alla fasföljder i % i förhållande till grundtonen.
- THD_l för positiv fasföljd i % i förhållande till grundtonen.
- THD_l för negativ fasföljd i % i förhållande till grundtonen.
- THD_l för nollföljd i % i förhållande till grundtonen.
- Total aktiv effekt i MW

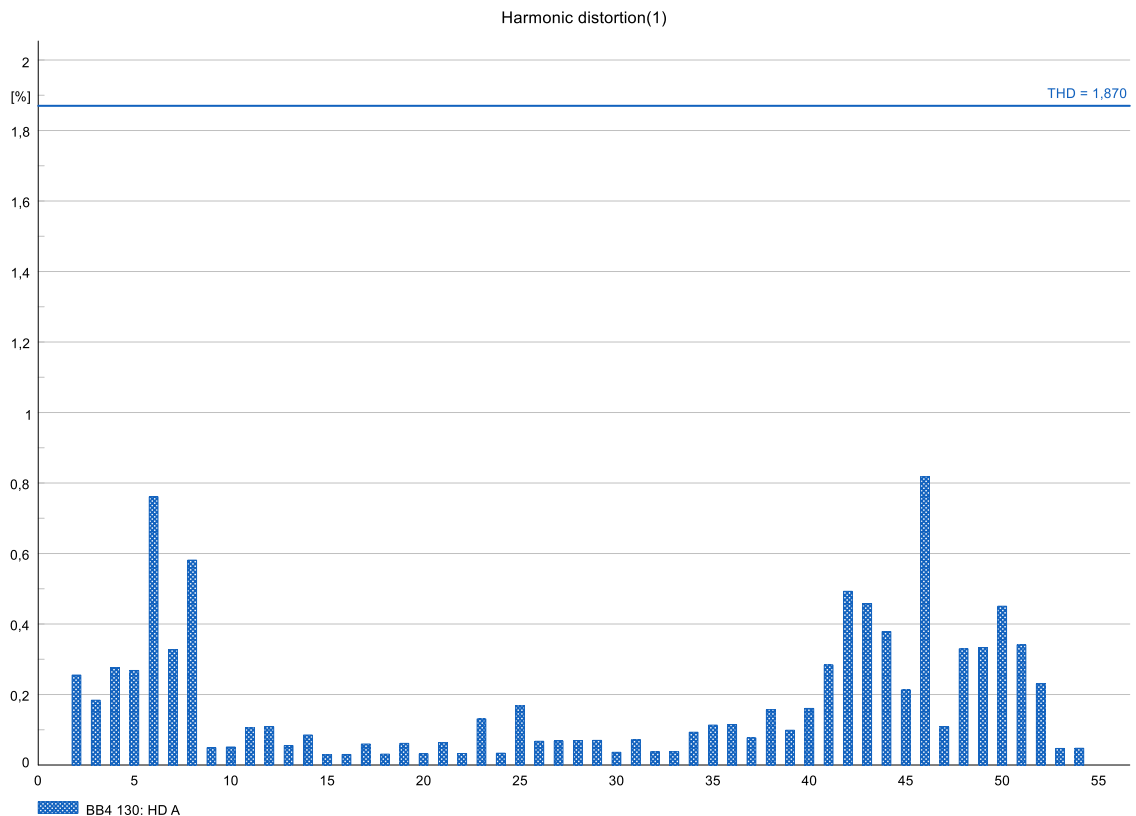
5.1 Scenario 1, 25%

I scenario 1 sker 25% av den totala elproduktionen via övertongenererande kraftelektronik. I figur 5.1 syns utbredningen av de genererade övertoner, där halten av övertoner är större ju närmre källan man kommer. I anslutningspunkten för vindkraftverket ”Static Generator” (kopplad till BB 400 i figur 5.1) går det att avläsa THD_u på 5,11%.



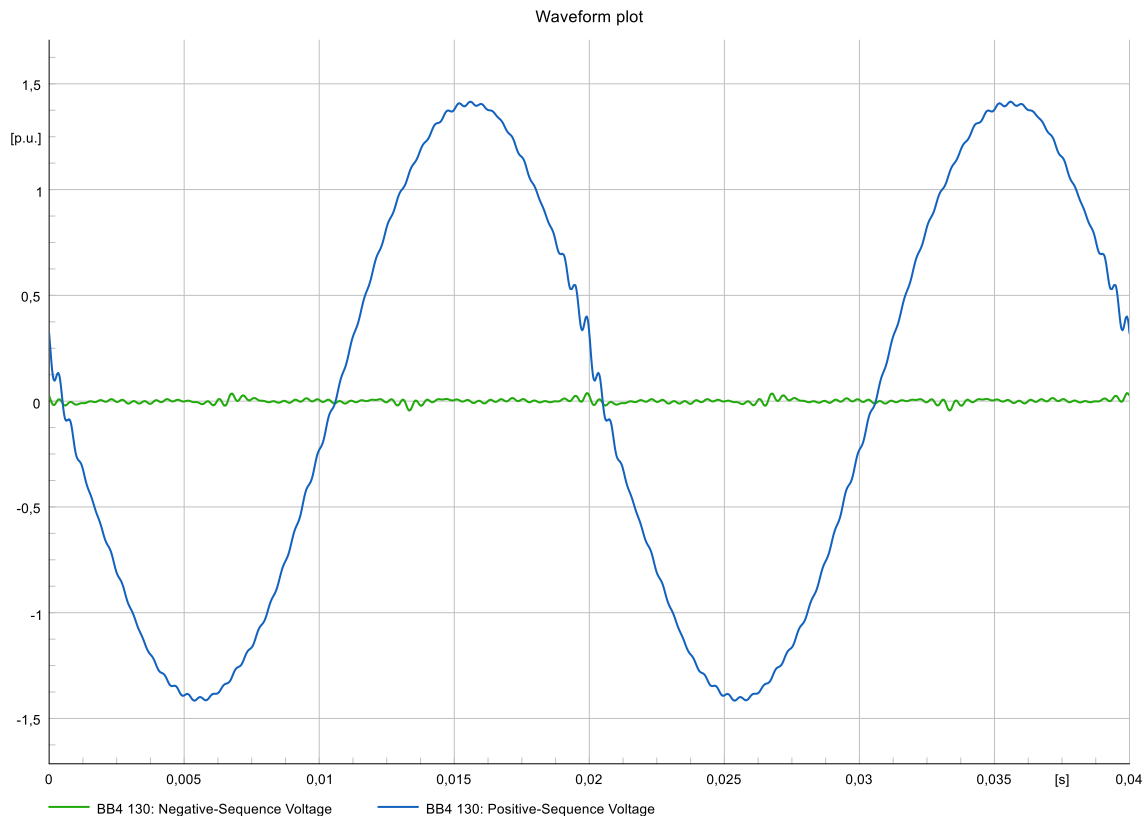
Figur 5.1, utbredning av övertoner när 25% av elproduktionen sker från vindkraftverket längst ned i ritningen. (Se appendix C för större bild).

Totala halten övertoner mitt i kraftsystemet går att avläsa från figur 5.2 där THD_u uppgår till 1,87%.



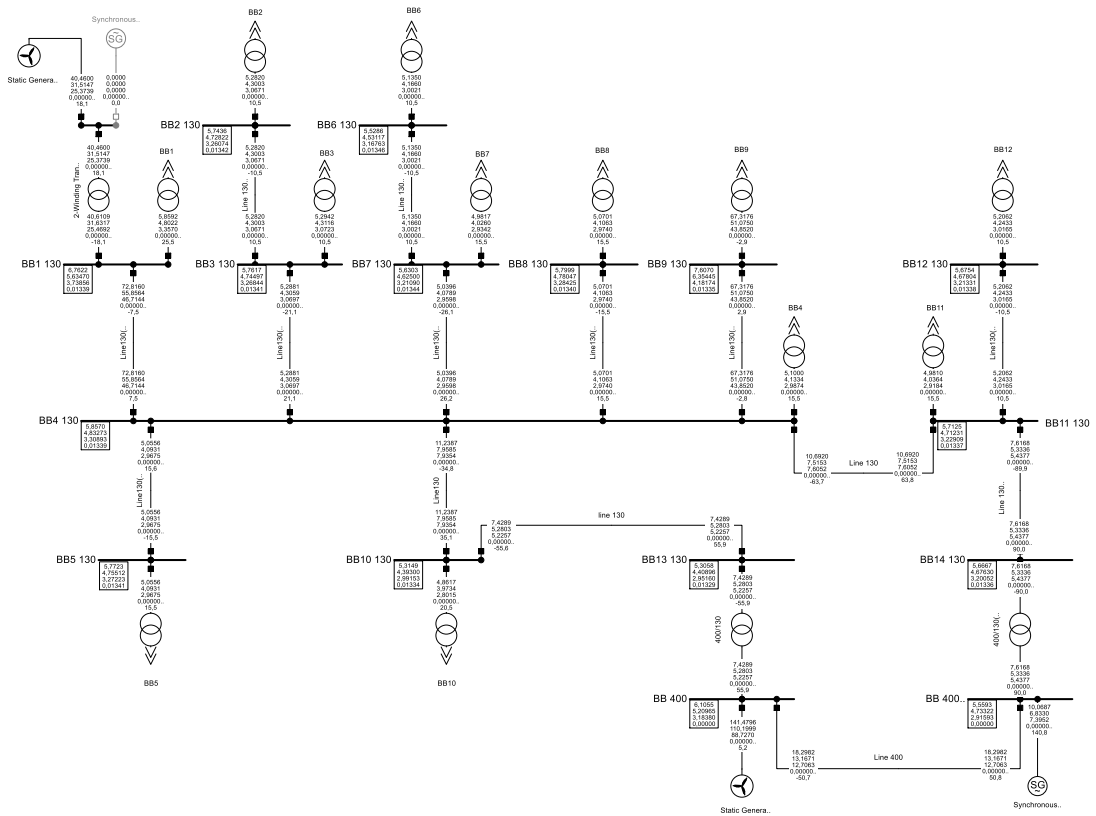
Figur 5.2, amplitud på individuella övertoner och THD_u vid BB4.

Resultatet av övertonerna från figur 5.2 går att se på figur 5.3 i utförande av kurvor där den blå kurvan är spänningskurvan av positiv fasföljd och inkluderar grundtonen på 50Hz. Den gröna spänningskurvan är av negativ fasföljd.



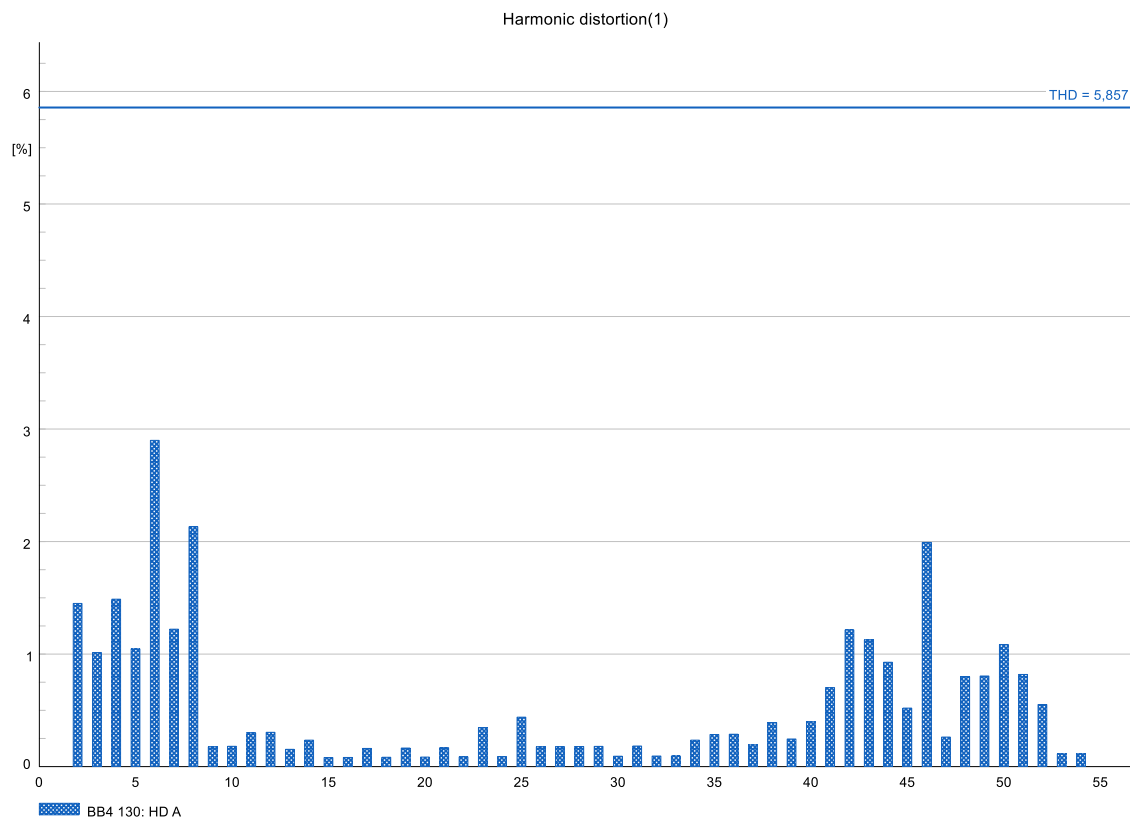
Figur 5.3, grön kurva är spänning med negativ fasföljd, blå kurva har positiv fasföljd (inkluderat grundtonen).

När produktionen från kraftelektroniken delas upp enligt förklaringen i kapitel 3.4 ger det en utbredning av övertoner som visas i figur 5.4. Om figur 5.4 och figur 5.1 jämförs har den generella övertonshalten i hela kraftsystemet stigit exempelvis för punkten där vindkraftverket kopplas in på 400 kV har THD_u gått från 5,11% till 6,11%. Även THD_I för kraftsystemet har ökat där flertalet ledningar har tvåsiffriga halter.



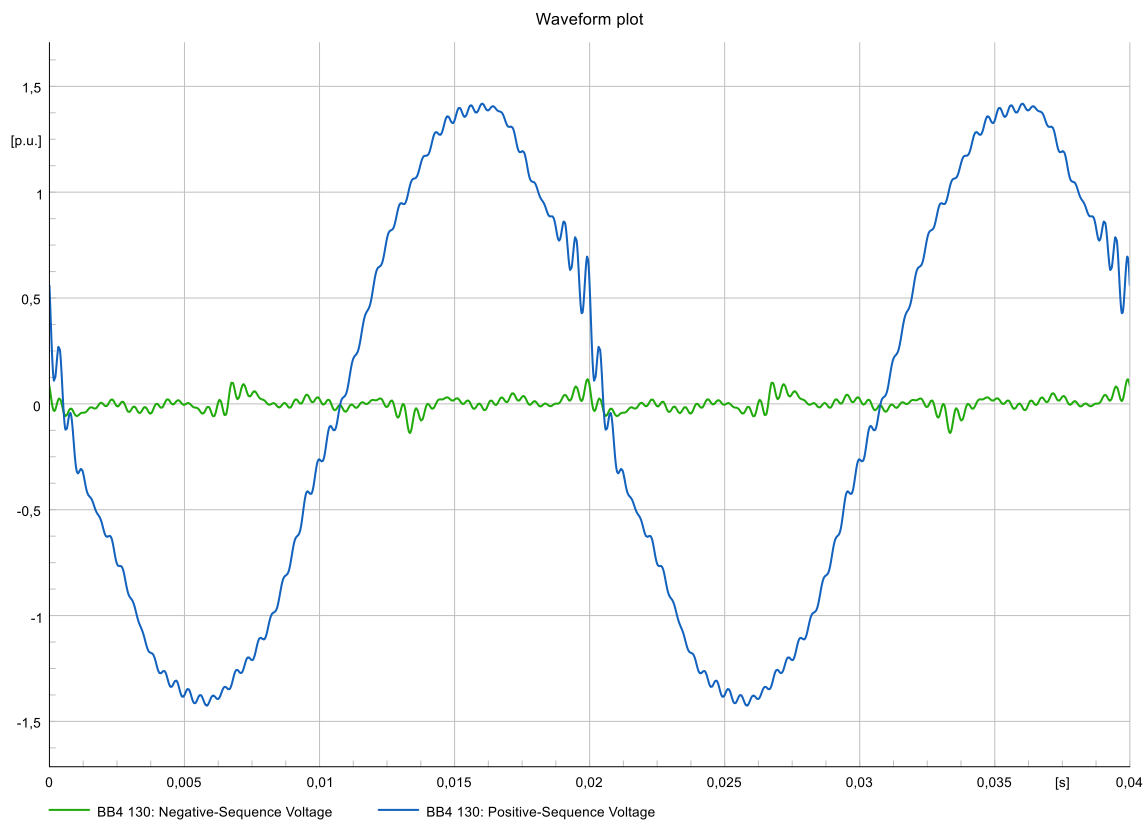
Figur 5.4, utbredning av övertoner när 25% av totala elproduktionen sker från kraftelektronik fördelat över elnätet. (Se appendix D för större bild).

THD_u för kopplingskena BB4 anges i figur 5.5 där halten stigit från 1,87% till 5,857%. I figur 5.5 syns även att de lägre övertonerna har ökat i förhållande till de av högre ordning.



Figur 5.5, amplitud på individuella övertoner och THD_u vid BB4.

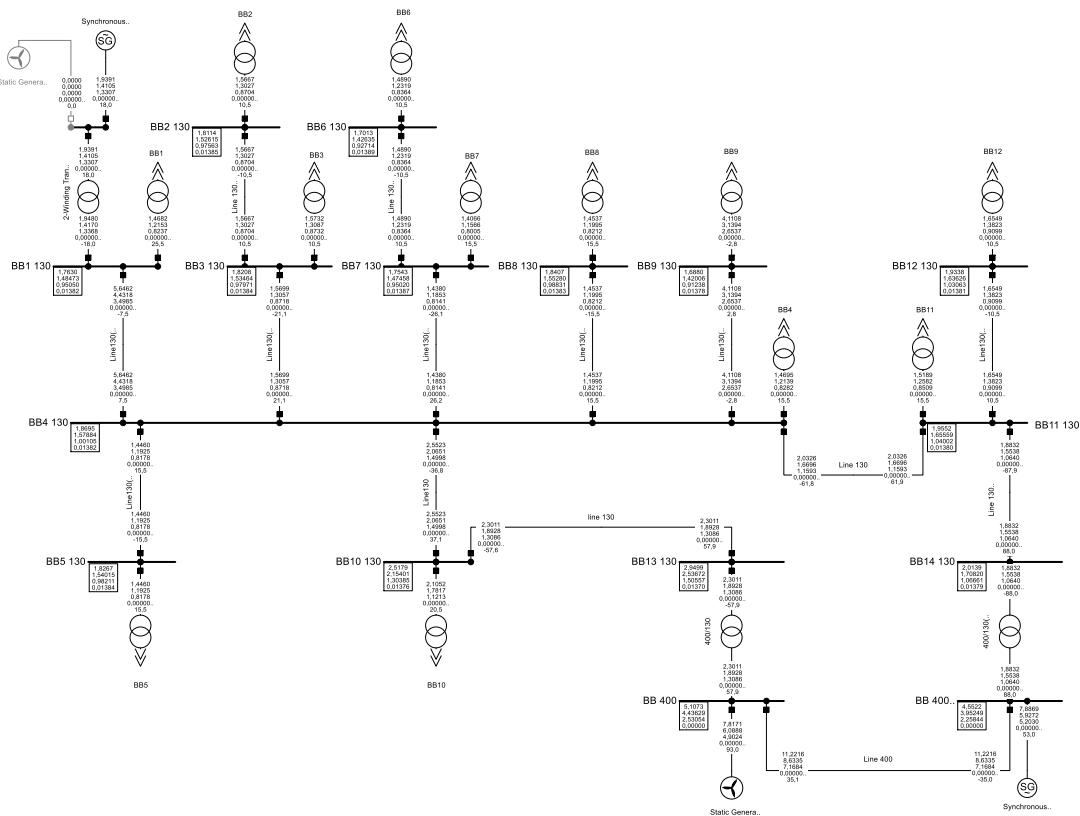
Övertonerna i figur 5.5 ger upphov till de kurvformer som visas i figur 5.6 även där går det att urskilja den ökade halten övertoner närvarande vid kopplingskena BB4.



Figur 5.6, grön kurva är spänning med negativ fasföljd, blå kurva har positiv fasföljd (inkluderat grundtonen).

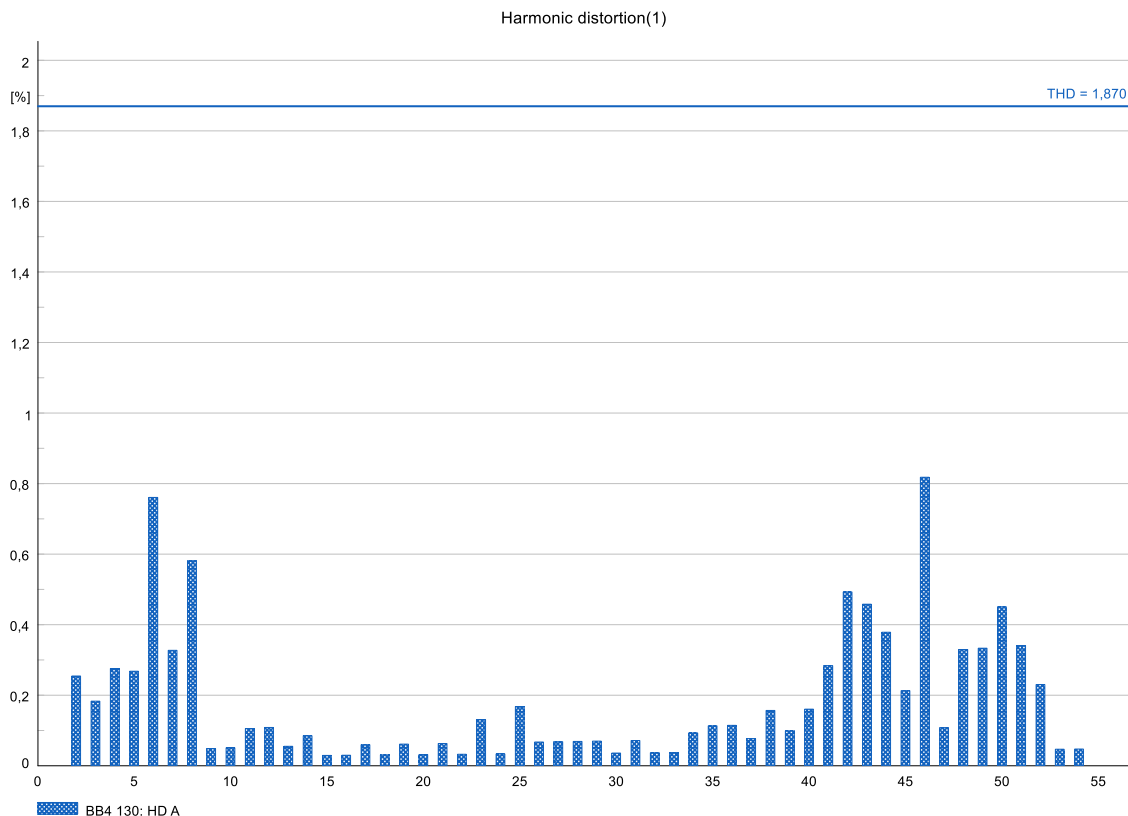
5.2 Scenario 2, 50%

I scenario 2 ökades andelen effekt från kraftelektronik till 50% av den totala effekten som konsumeras av de 12 lasterna i simuleringsmodellen. Effekten producerad av kraftelektronik uppgår i scenario 2 till 93 MW. I första delen genereras all den effekten av vindkraftverket längst ned i figur 5.7. Studeras figur 5.7 och jämförs med motsvarande figur i scenario 1 dvs. figur 5.1 är skillnaden störst vid vindkraftverket där THD_1 för ledare i anslutningen minskat med upp till 11%, däremot är förändringen i Ampere för samma ledare en ökning på någon mA för varje individuell överton. Exempelvis har H6 gått från 6,538A i scenario 1 till 6,541A i scenario 2. Anledningen till att THD_1 minskat trots att övertonerna i Ampere ökat beror förmodligen på att övertonerna i simuleringsmodellen räknas ut i förhållande till grundtonen. På det viset är strömövertonerna även kopplade till hur mycket effekt som går genom ledaren.



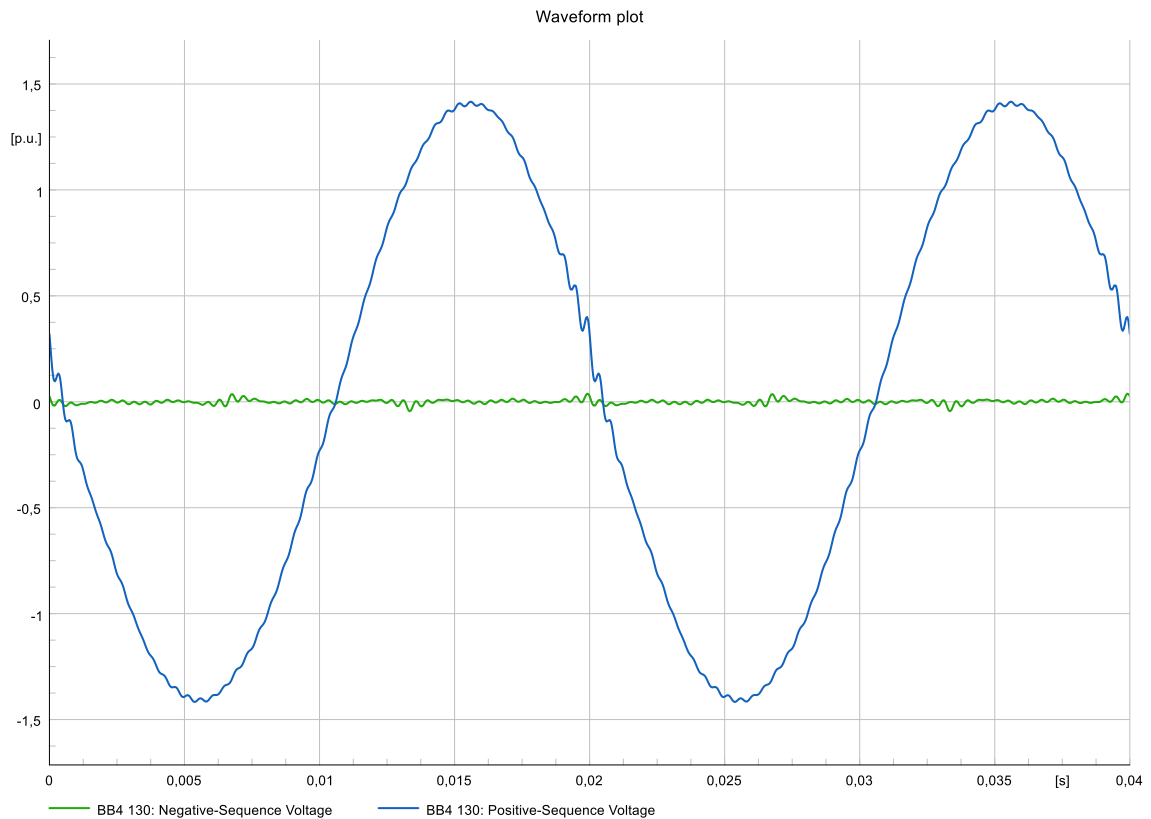
Figur 5.7, utbredning av övertoner när 50% av elproduktionen sker från vindkraftverket längst ned i ritningen. (Se appendix E för större bild).

Vid kopplingskena BB4 är skillnaden mellan scenario 1 och scenario 2 minimal och inte möjlig att urskilja okulärt i figur 5.8.



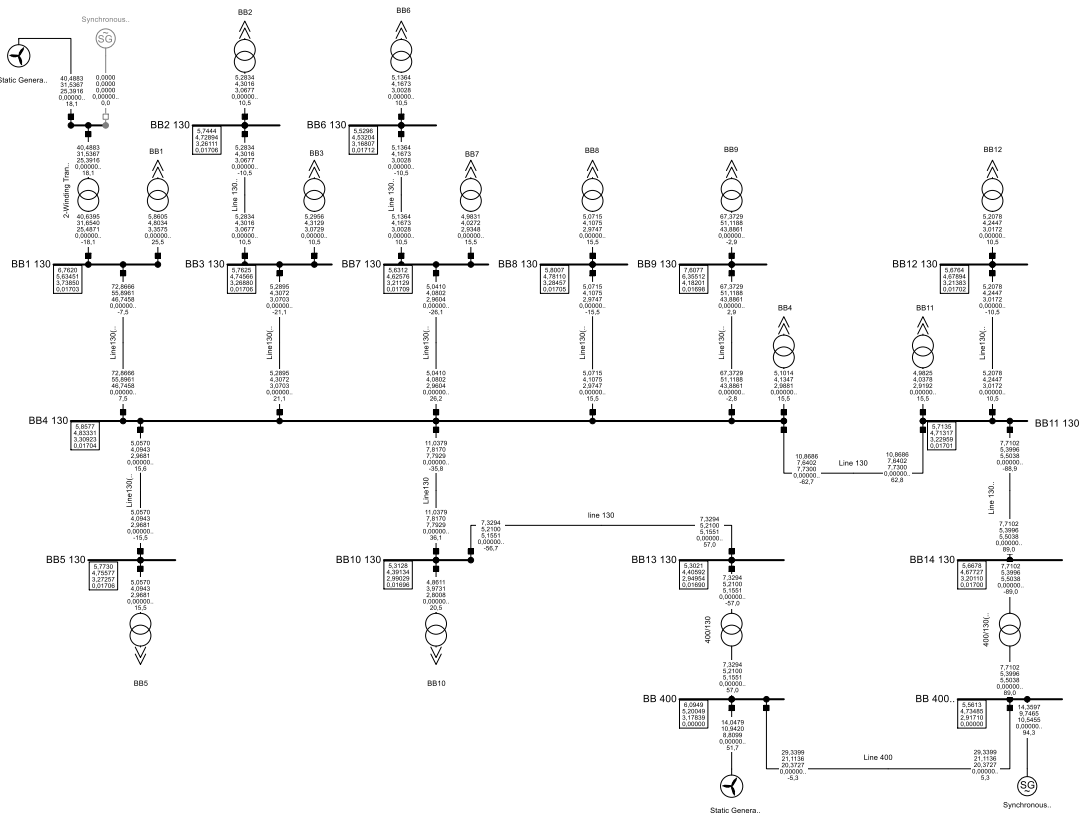
Figur 5.8, amplitud på individuella övertoner och THD_u vid BB4.

Figur 5.9 visar spänningsövertonerna i figur 5.8 i kurvformat.



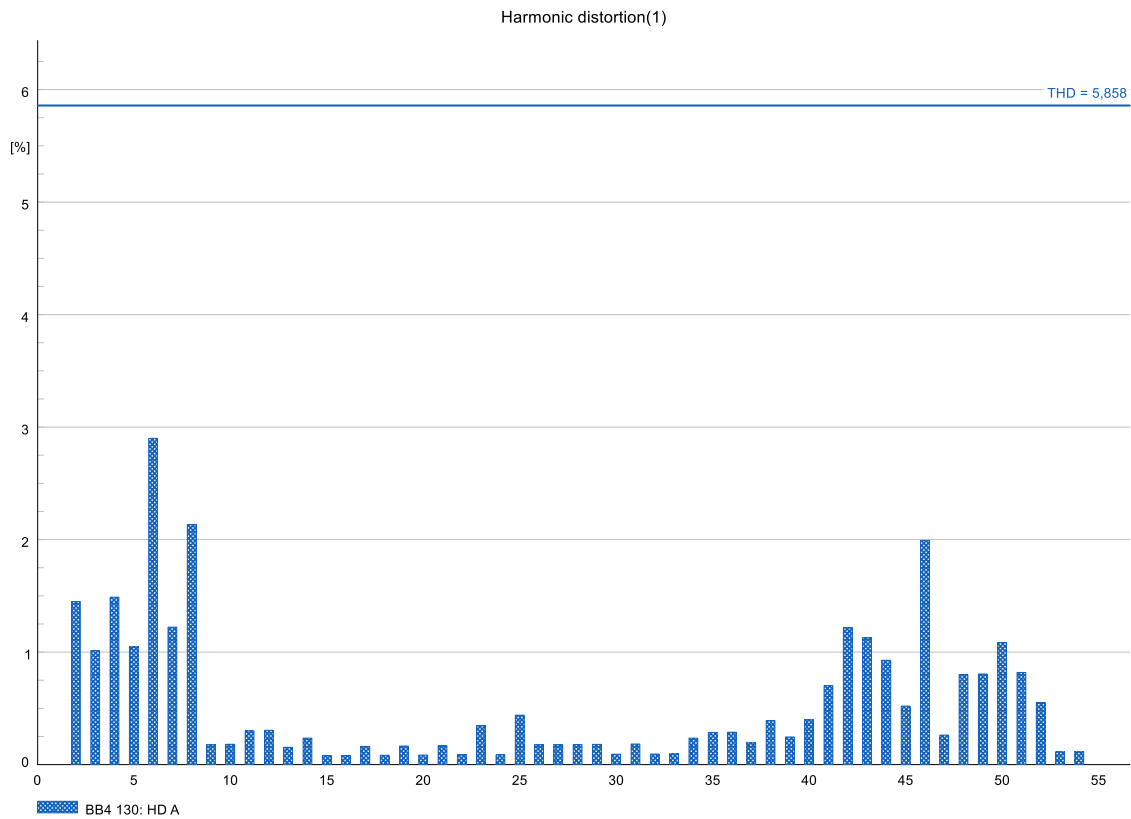
Figur 5.9, grön kurva är spänning med negativ fasföljd, blå kurva har positiv fasföljd (inkluderat grundtonen).

Andra delen av scenario 2 utformades enligt kapitel 3.4. I figur 5.10 syns en viss minskning i både ström och spänningsövertoner bortsett från 400 kV-kabeln där THD_I i stället har ökat.



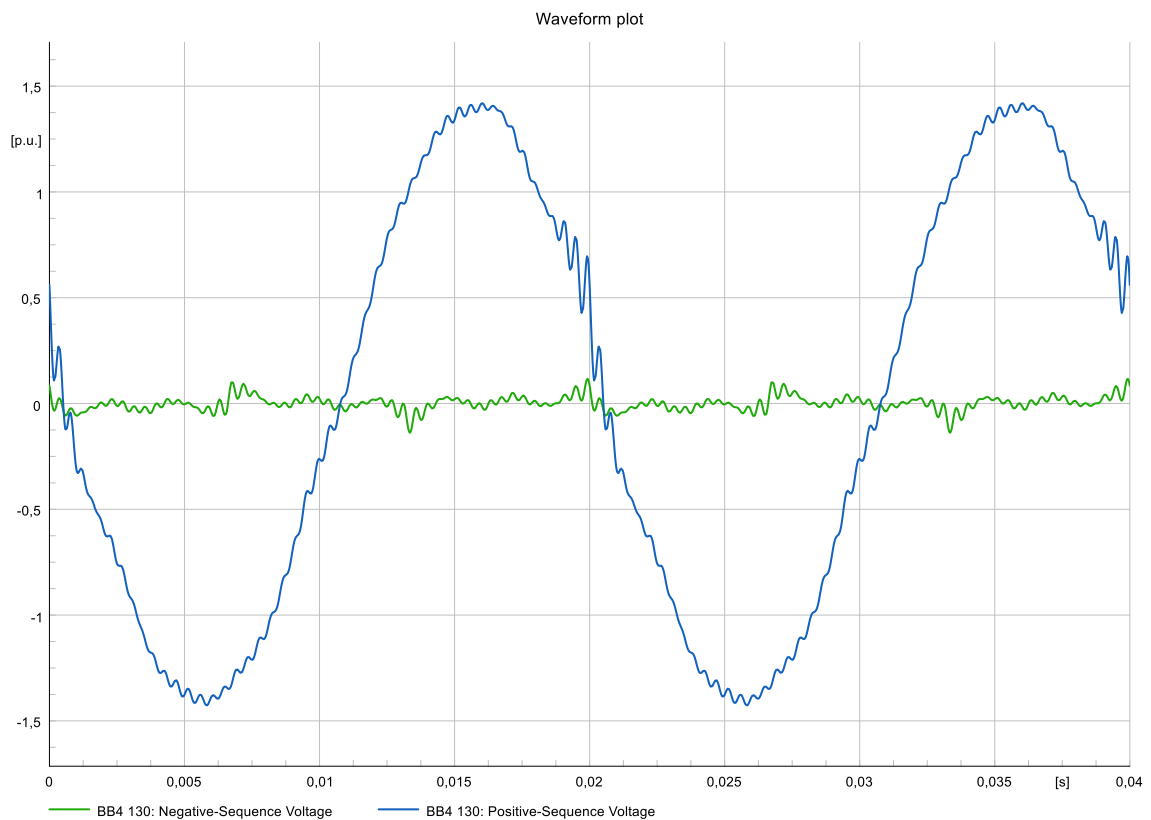
Figur 5.10, utbredning av övertoner när 50% av totala elproduktionen sker från kraftelektronik fördelat över elnätet. (Se appendix F för större bild).

I figur 5.11 presenteras de individuella spänningsövertoner för kopplingskena BB4. Det går att avläsa samma trend som för scenario 1 att de övertoner av lägre ordning ökar i förhållande till de övertoner med högre ordning när inmatningen från den produktion som sker av kraftelektronik är uppdelad i elnätet.



Figur 5.11, amplitud på individuella övertoner och THD_u vid BB4.

Figur 5.12 är stapeldiagrammet i figur 5.11 representerat i kurvformat, där den ökade mängd spänningsövertoner tydligt förvränger grundtonen på 50Hz.

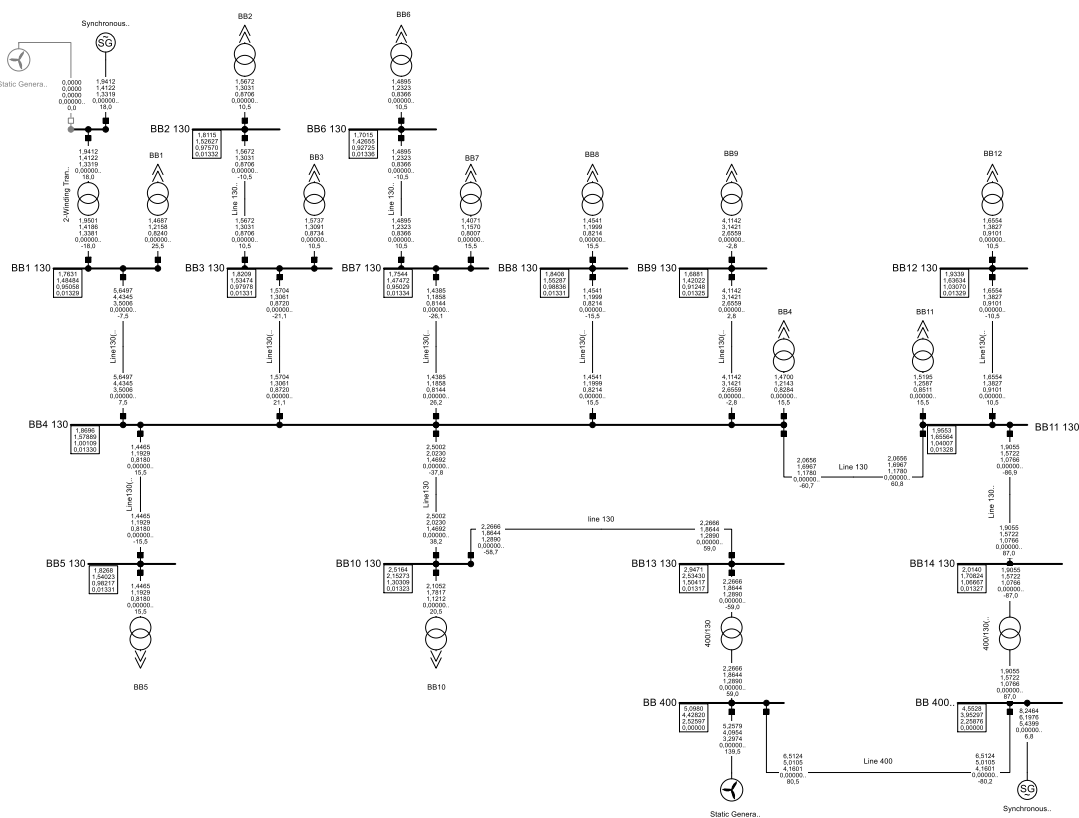


Figur 5.12, grön kurva är spänning med negativ fasföljd, blå kurva har positiv fasföljd (inkluderat grundtonen).

5.3 Scenario 3, 75%

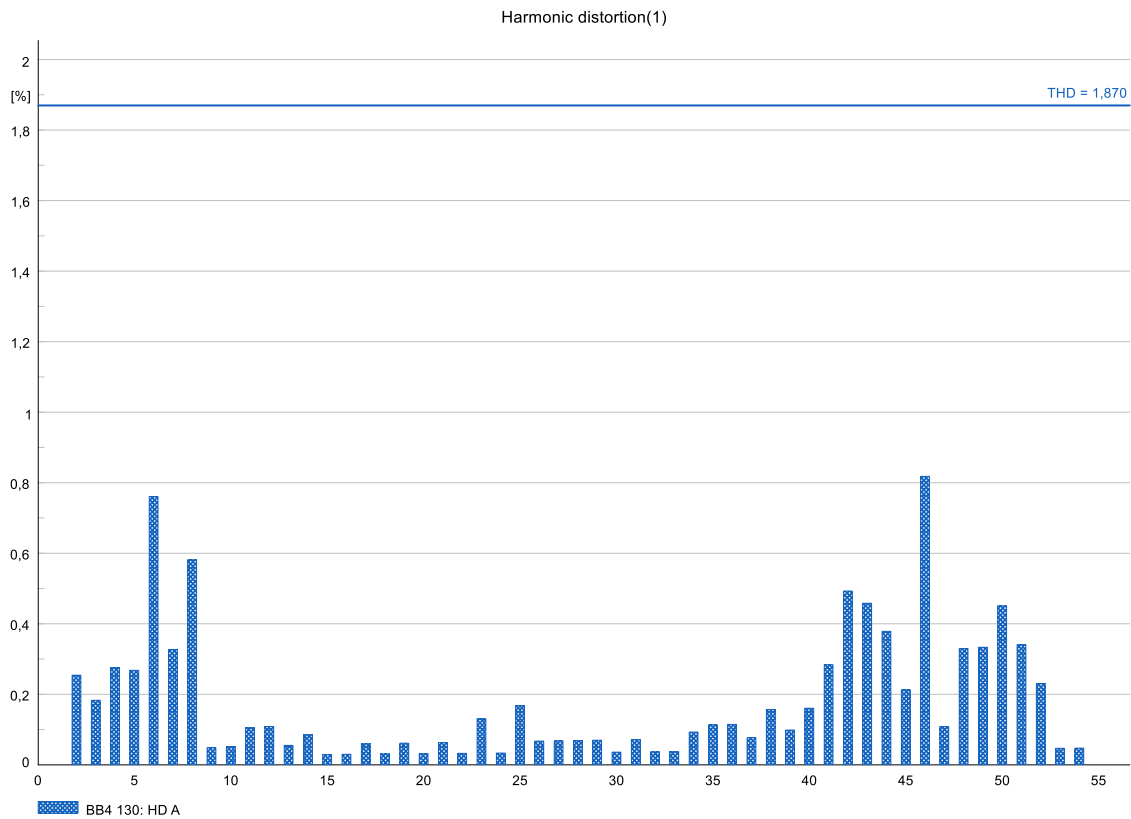
I scenario 3 har effekten som producerats av kraftelektronik ökat till 75% av den totala förbrukade effekten. Den effekt som produceras av kraftelektronik i scenario 3 uppgår då till 139,5MW.

Figur 5.13 presenteras fördelningen av övertoner i elnätet för den första delen av scenario 3. Skillnaden i ökad effekt resulterar i en minskning av andelen strömövertoner, vilket i sin tur leder till en minskning av andelen spänningsövertoner. Den här förändringen är mest framträdande i anslutning till vindkraftverket.



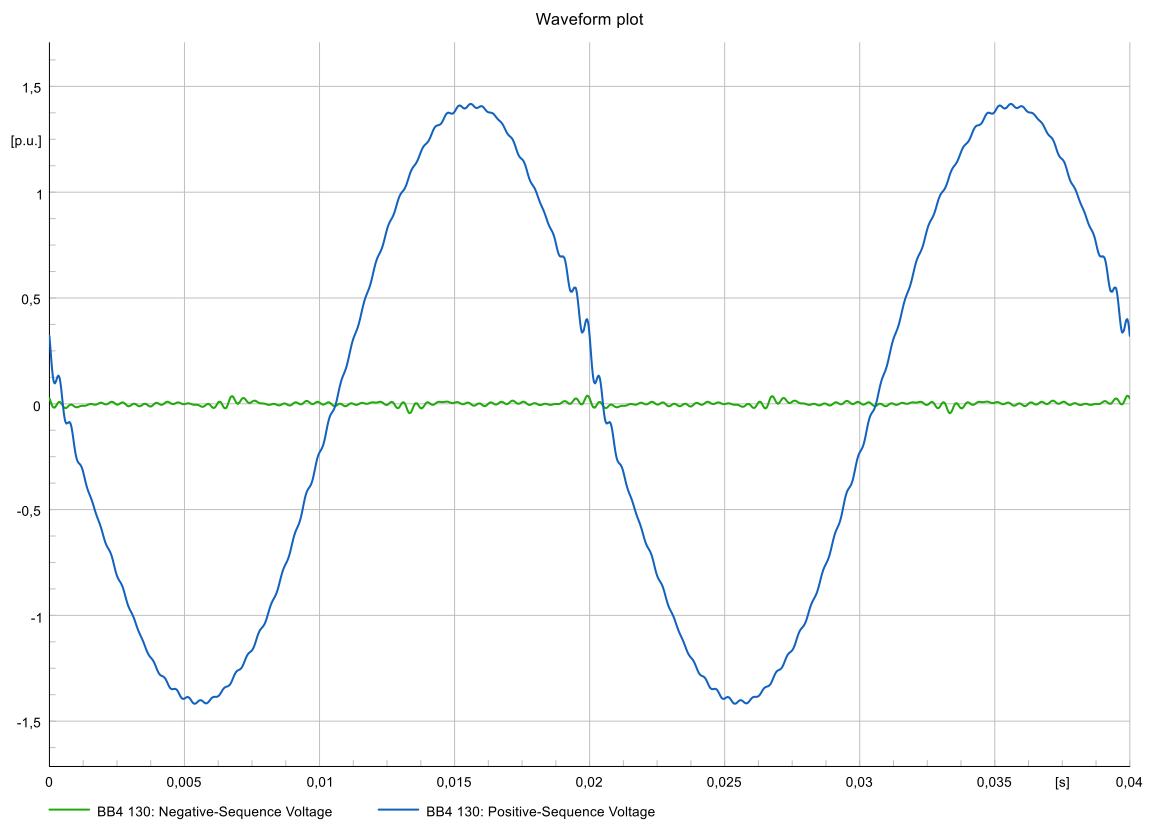
Figur 5.13, utbredning av övertoner när 75% av elproduktionen sker från vindkraftverket längst ned i ritningen. (Se appendix G för större bild).

Likt jämförelsen mellan scenario 1 och 2, går återigen ingen skillnad i spänningsövertoner vid kopplingskema BB4 inte urskilja i figur 5.14 jämfört med figur 5.2 och figur 5.8. Det då upplösningen på stapeldiagrammet inte är tillräckligt hög eftersom skillnaden först sker på 4e decimalen enligt figur 5.13.



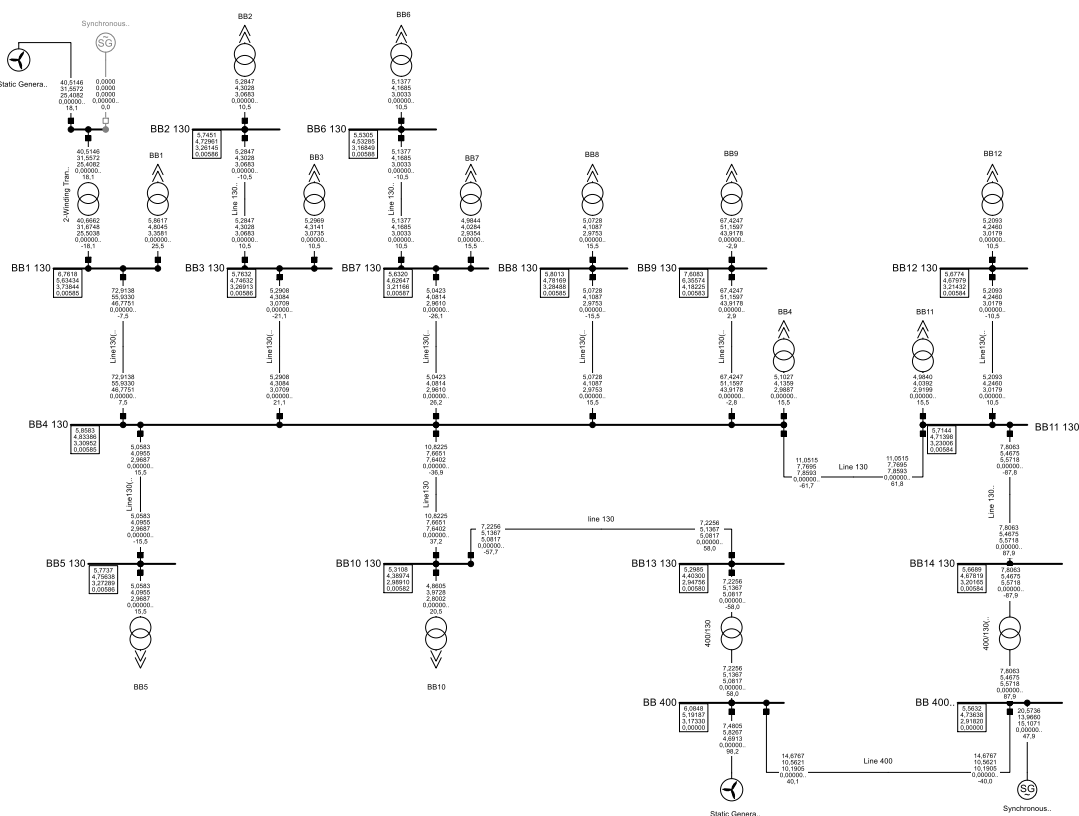
Figur 5.14, amplitud på individuella övertoner och THD_u vid BB4.

Figur 5.15 är övertonerna i 5.14 omgjorda till kurvform för att se påverkan på grundtonen.



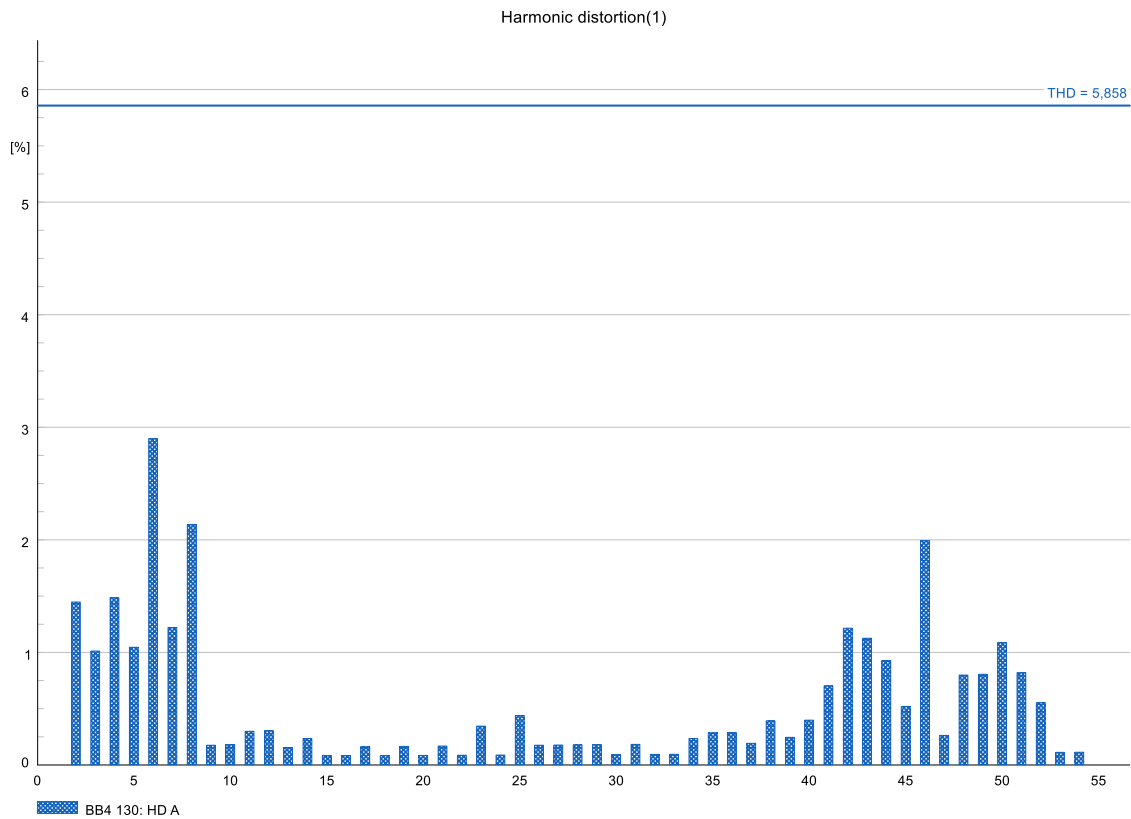
Figur 5.15, grön kurva är spänning med negativ fasföljd, blå kurva har positiv fasföljd (inkluderat grundtonen).

I den andra delen av scenario 3, där produktionen från kraftelektroniken är fördelad över elnätet enligt figur 5.16, går det att urskilja en liknande trend som har observerats från scenario 1 och 2 att övertonshalten minskar när andelen effekt från kraftelektronik ökar. I scenario 3 har också strömövertonerna i 400 kV-kabeln minskat. Det är även värt att poängtera hur effektflödet i kabeln har ändrat riktning från scenario 2 till scenario 3, och att effektflödet i kabeln har ökat.



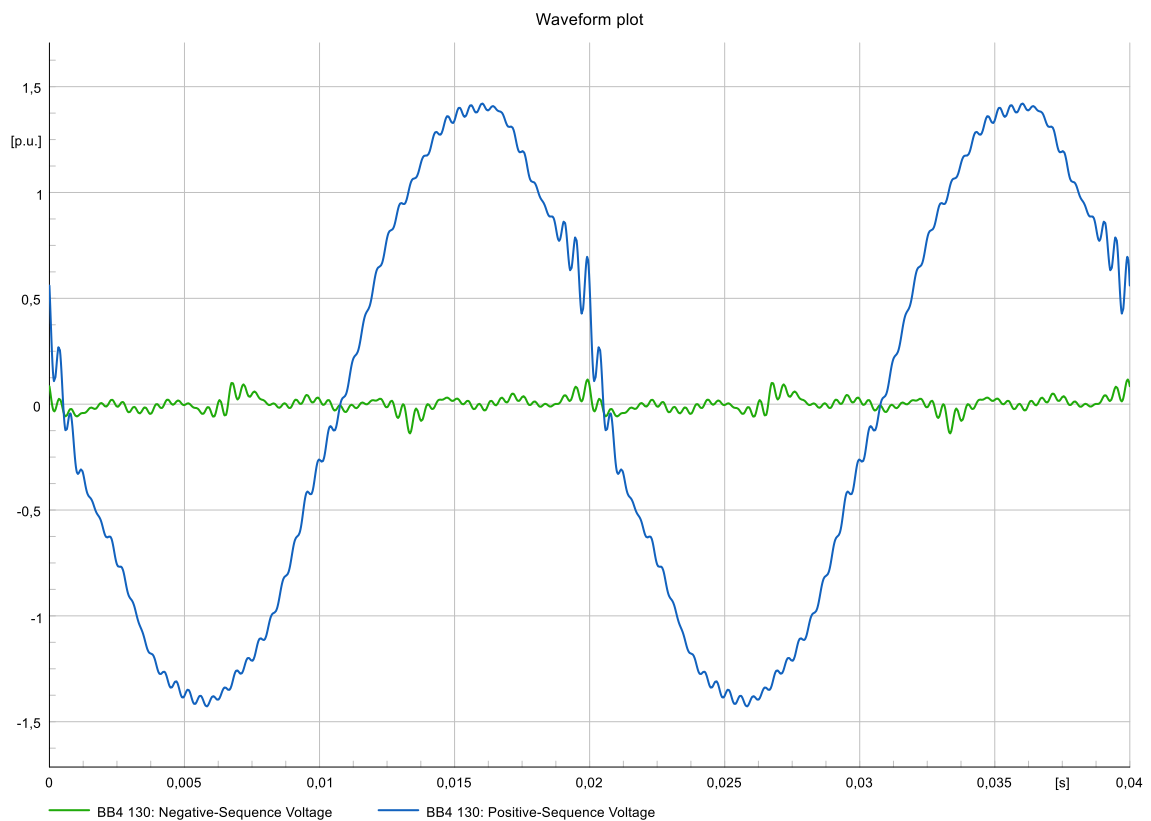
Figur 5.16, utbredning av övertoner när 75% av totala elproduktionen sker från kraftelektronik fördelat över elnätet. (Se appendix H för större bild).

Studeras figur 5.17, går det inte att se skillnaderna mellan stapeldiagrammen i de olika scenarierna då de är för små för att tydligt skilja sig åt i jämförelse med exempelvis figur 5.11. Dock kan liknande trend i amplitud mellan övertoner av högre respektive lägre ordning urskiljas, jämfört med figur 5.14.



Figur 5.17, amplitud på individuella övertoner och THD_u vid BB4.

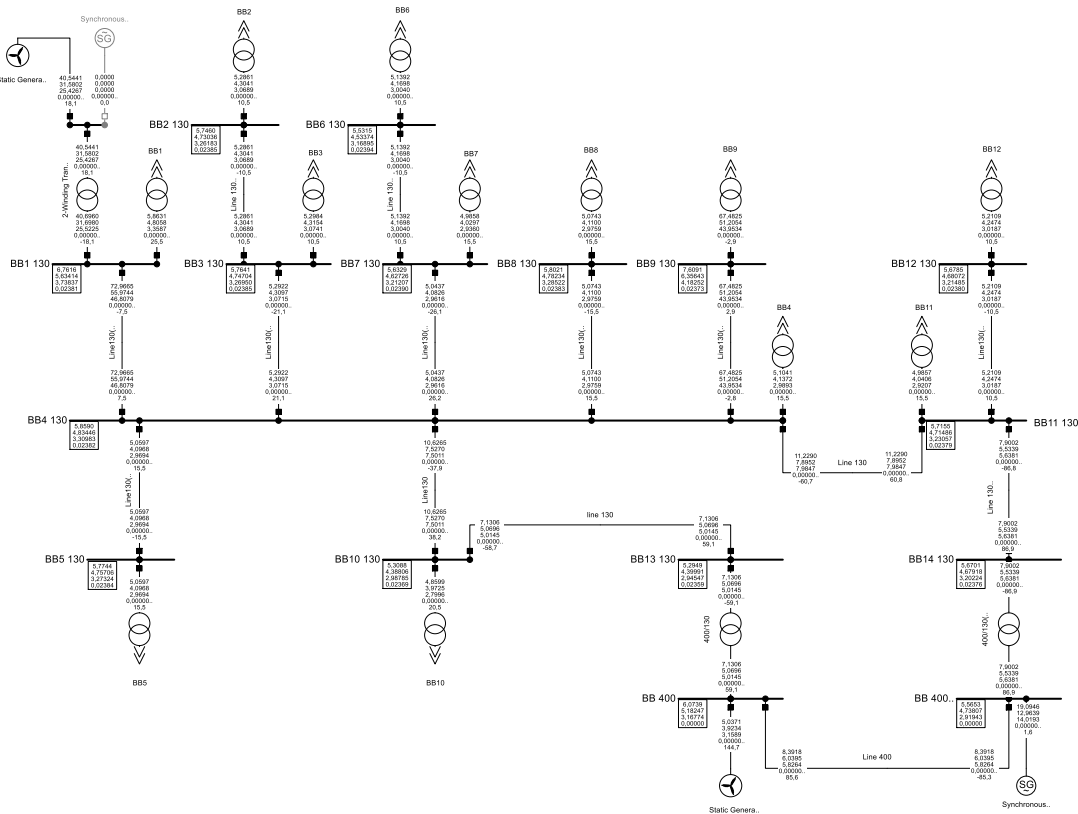
Figur 5.18 visar stapeldiagrammet från figur 5.17 i kurvform.



Figur 5.18, grön kurva är spänning med negativ fasföljd, blå kurva har positiv fasföljd (inkluderat grundtonen).

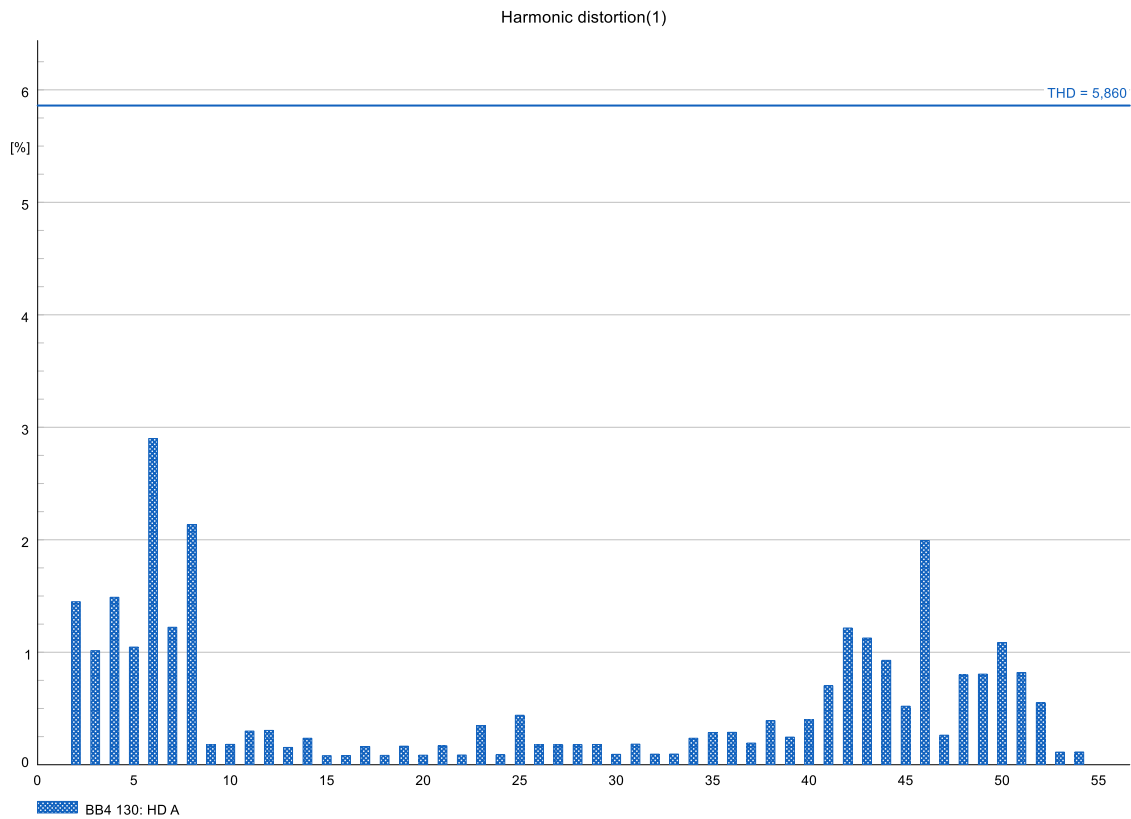
5.4 Scenario 4, 100%

Som nämnt i kapitel 3.4 har scenario 4 begränsats till den del då effekten som produceras av kraftelektroniken är fördelat över elnätet. I figur 5.19 presenteras utbredningen av övertoner när lasternas totala effekt produceras av kraftelektronik. Likt tidigare minskar övertonerna kring vindkraftverket men i scenario 4 ökar övertonerna vid kopplingskena BB4 något vilket är ett trendbrott sett till de tidigare scenarierna.



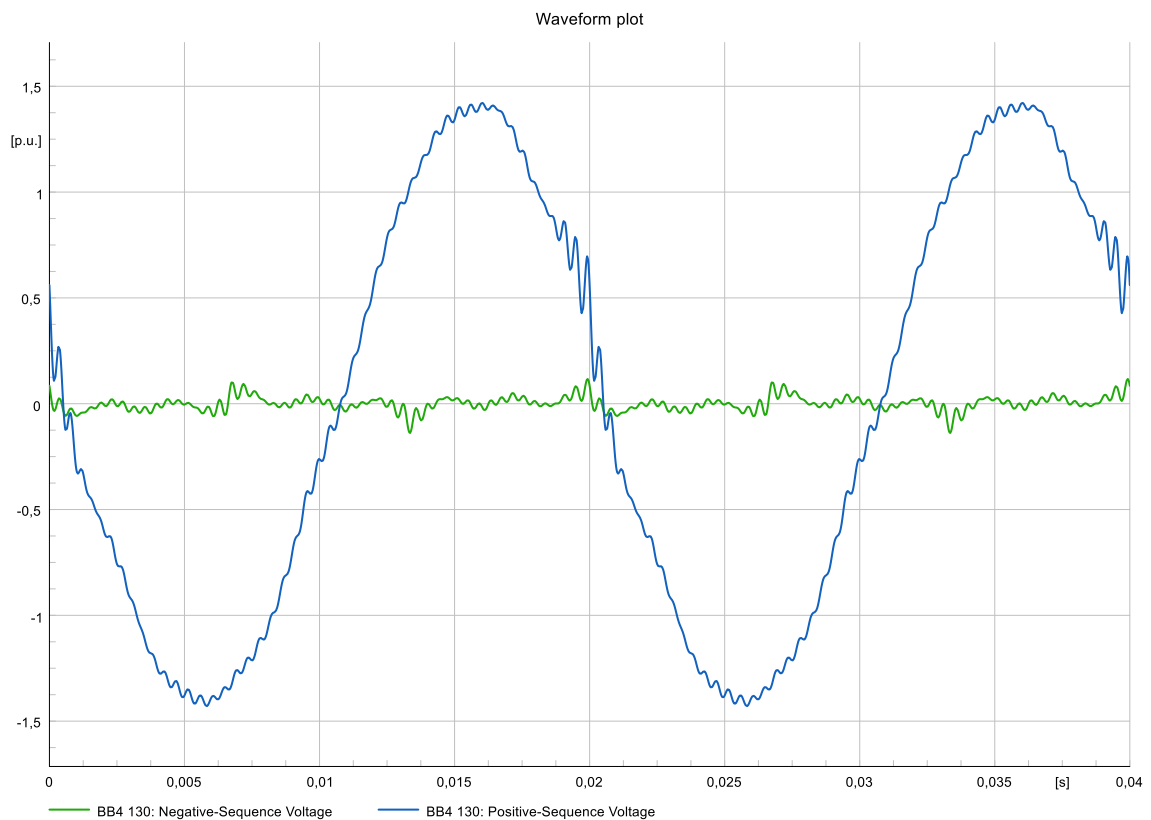
Figur 5.19, utbredning av övertoner när 100% av totala elproduktionen sker från kraftelektronik fördelat över elnätet. (Se appendix I för större bild).

I figur 5.20 visas spänningsövertonerna vid kopplingskena BB4, trendbrottet är svårt att tyda på de individuella övertonerna men visas av THDu som ökat till 5,86%.



Figur 5.20, amplitud på individuella övertoner och THD_u vid BB4.

Figur 5.21 visar stapeldiagrammet från figur 5.20 i kurvform.



Figur 5.21, grön kurva är spänning med negativ fasföljd, blå kurva har positiv fasföljd (inkluderat grundtonen).

5.5 Sammanfattning resultat

Sammanfattningsvis visar resultaten som presenterats i kapitel 5 hur en ökad effekt från kraftelektronik reducerar halten övertoner på de flesta ställen i elnätet. Övertonerna har svårt att breda ut sig i elnätet när injektionen endast sker i en punkt. När injektionen av strömövertoner fördelas i elnätet men den totala effekten producerad från kraftelektronik förblir densamma ökar i stället mängden övertoner i hela systemet.

Det kan vara värt att visa på korrelationen mellan ökade strömövertoner för ledarna i systemet i förhållande till den effekt som transporteras genom ledaren. I många av fallen där strömövertonerna är avvikande höga som för kabeln mellan BB1 och BB4 likt den kabel mellan BB9 och BB4 är den effekt som transporteras mellan kopplingskenorna betydligt mindre än för de effekter som transporteras till de andra skenorna, 7,5MW respektive -2,8MW. Den höga andelen övertoner i dessa ledare berodde främst på hur simuleringen räknade ut övertoner. Övertonerna är uträknade i förhållande till grundtonen, och då förändringen för strömövertonernas nivåer i Ampere inte är så stor, blir den procentuella skillnaden mellan grundtonen och övertonerna betydligt högre då en lägre effekt transporteras genom ledningen. Därav uppkommer de till synes väldigt höga halterna THD_I på vissa ställen i simuleringsmodellen

Det visades också en stor skillnad i amplituder mellan de spänningsövertoner av lägre respektive högre ordningen i förhållande till varandra vid kopplingskena BB4. De övertoner av lägre ordning var endast av större amplitud när produktionen från kraftelektronik var utspridd i elnätet. Det trots att ströminjektionen för exempelvis H6 nästan har den dubbla amplituden i förhållande till H46. Båda övertoner är de med högst amplitud för de av lägre respektive högre ordning.

6 Slutsats

Resultaten som redovisats i det här arbetet visar på hur en ökad del kraftelektronik i ett elnät inte nödvändigtvis betyder att övertonshalten ökar. Resultaten visar att placeringen i elnätet har större betydelse för utbredningen av övertoner i elnätet än vad den totala effekten som produceras av kraftelektronik har. I simuleringsmodellen är inga övertonsfiler inlagda vilket gör att det endast är impedansen i systemet som begränsar eller förstärker övertonernas spridning.

Den totala halten av övertoner i simuleringsmodellen är något som kan vara skadligt i vissa delar av simuleringsmodellen. Exempelvis är amplituden för övertonerna H4, H6 och H8 i del 2 av alla scenarion kring 1,5% för H4 2,9% för H6 och 2,1% för H8. Jämförs det mot standarden ligger gränsvärdena på 1% för H4 respektive 0,5% för H6 och H8, det är nästan 6 gånger det tillåtna för H6. Tas det också i beaktande att multiplar av switchfrekvensen inte är närvarande i ströminjektionerna borde det bidra till en högre andel övertoner, förmodligen primärt i anslutningspunkten.

När det gäller dagens standarder finns det en risk att de kan vara otillräckliga eftersom de oftast har begränsningar för övertoner upp till H25. Även om omriktare för elproduktion idag sällan genererar höga halter av övertoner över H26, så har det skett en förändring så att de övertoner som genereras av kraftelektronik, nu huvudsakligen sker vid högre frekvenser. Det innebär att de övertoner som släpps ut inte begränsas av standarder idag utan enbart av tillverkarnas egna intressen att hålla övertoner nere.

6.1 Samhällsnyttan

Att studera hur övertoner påverkar elnätet kan ha flera samhällsnyttor. Övertoner kan orsaka problem i ett elnät, en del av dessa förklarades i kapitel 2.7. Genom att öka kunskapen till hur övertoner uppkommer och sprider sig i ett kraftsystem kan åtgärder vidtas för att minska andelen övertoner på ett kostnadseffektivt vis och således minska energiförluster, öka livslängden på apparater och minska reparationskostnader.

6.2 Framtida utvecklingsmöjligheter

Framtida utvecklingsmöjligheter till det här examensarbete vore att implementera ett övertonsspektrum från en flernivåomriktare där frekvensbandet är tillräckligt brett för att multiplar av switchfrekvensen ska vara representerade. Dessutom vore det mer verklighetstroget om även mellantoner hade implementerats i simuleringsmodellen.

För ett mer verklighetstroget resultat bör även fler källor till övertoner implementeras med olika övertonsspektrum och med fasvinklar för övertonerna angivna.

7 Källförteckning

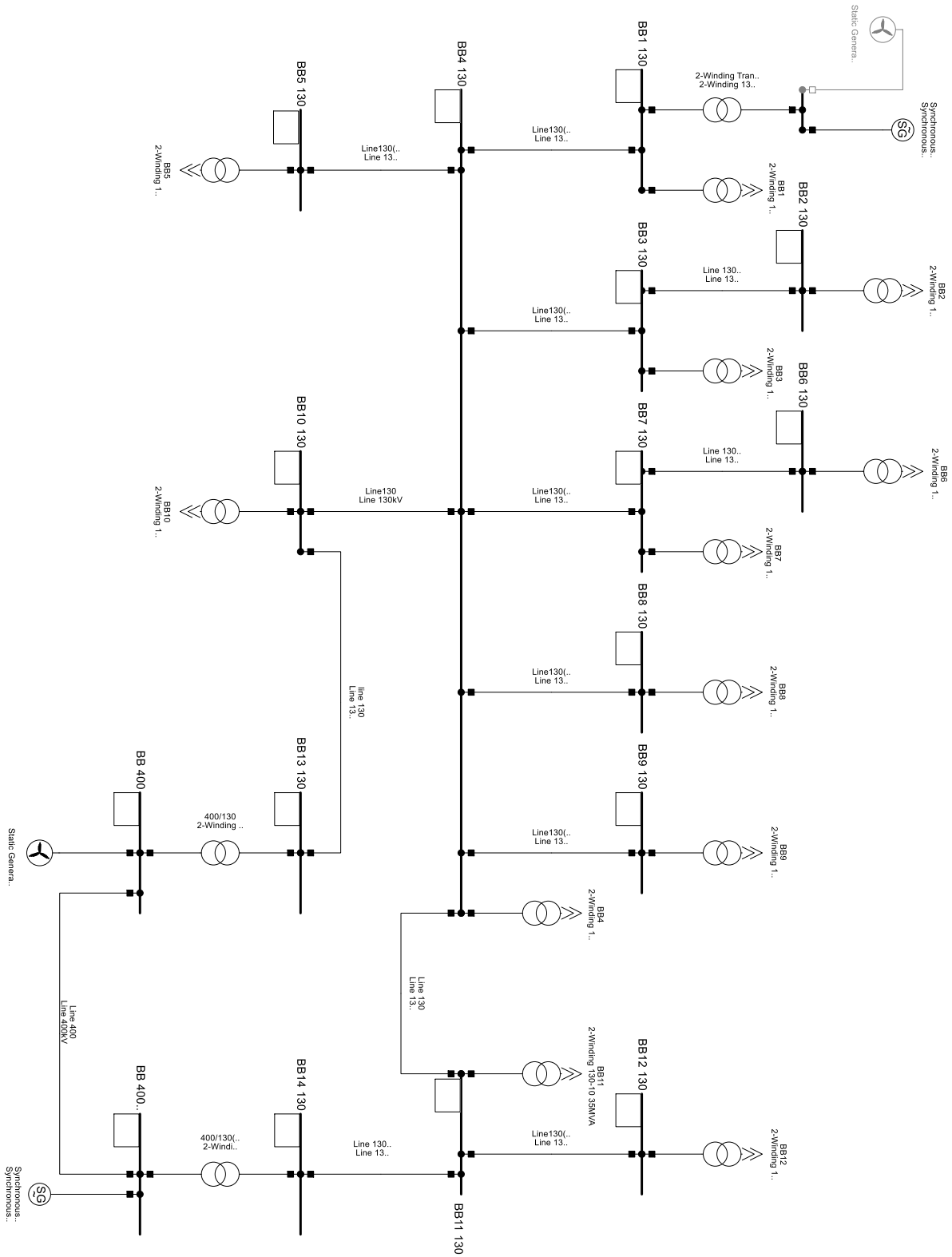
- [1] SVK, "Sveriges elnät", 9 mars 2021. [Online]. Available: <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/oversikt-av-kraftsystemet/sveriges-elnat/>. [Accessed 21 11 2022]
- [2] L&T, "Understanding current & voltage harmonics", [Online]. Available: <https://corpwebstorage.blob.core.windows.net/media/36814/understanding-current-voltage-harmonics.pdf>. [Accessed 30 03 2023]
- [3] J. Arrillaga, N.R. Watson, "General harmonic indices" in *Power system harmonics*, 2nd ed. New Zealand: Wiley, 2004, ch. 1, sec. 3.3, pp.11
- [4] N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, "Basic concepts of switch-mode inverters" in *Power Electronics*, 2nd ed. New York, USA: Wiley, 1995, ch. 8, sec. 2, pp. 202-210
- [5] V. E. Wagner *et al.*, "Effects of harmonics on equipment," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 672-680, April 1993, doi: 10.1109/61.216874.
- [6] Cadence System Analysis, "The proximity effect in transmission lines." resources.system-analysis.cadence.com. Accessed: May 11, 2023. [Online.] Available: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-the-proximity-effect-in-transmission-lines>
- [7] Regionfakta "Elförbrukning per län", 28 oktober 2022. [Online]. Available: <https://www.regionfakta.com/skane-lan/energi/elforbrukning-per-lan/>. [Accessed 19 04 2023]
- [8] K. Yang, M. H. J. Bollen, E. O. A. Larsson and M. Wahlberg, "A statistic study of harmonics and interharmonics at a modern wind-turbine," *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, Romania, 2014, pp. 718-722, doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842921.
- [9] M. Triggianese, P. Marino, J. Morren and S. W. H. de Haan, "Reduction of Harmonics from MW-class Wind Turbines by Interlaced Active Front-Ends," *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, Spain, 2007, pp. 2607-2612, doi: 10.1109/ISIE.2007.4375019.

[10] *Spänningens egenskaper i elnät för allmän distribution*, SS-EN 50160, 2020-03-18

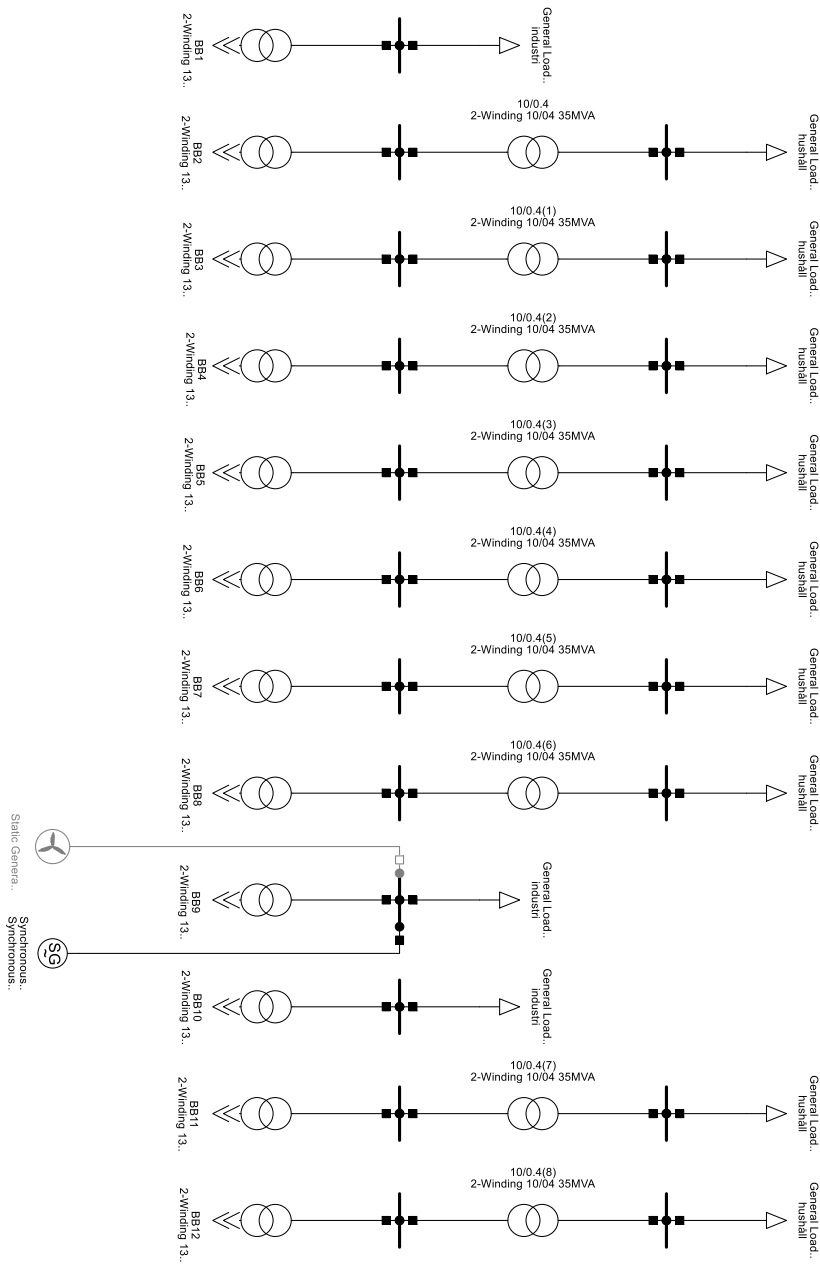
[11] *Energimarknadsinspektionens författningssamling*, EIFS 2013:1, 2013-08-30

8 Appendix

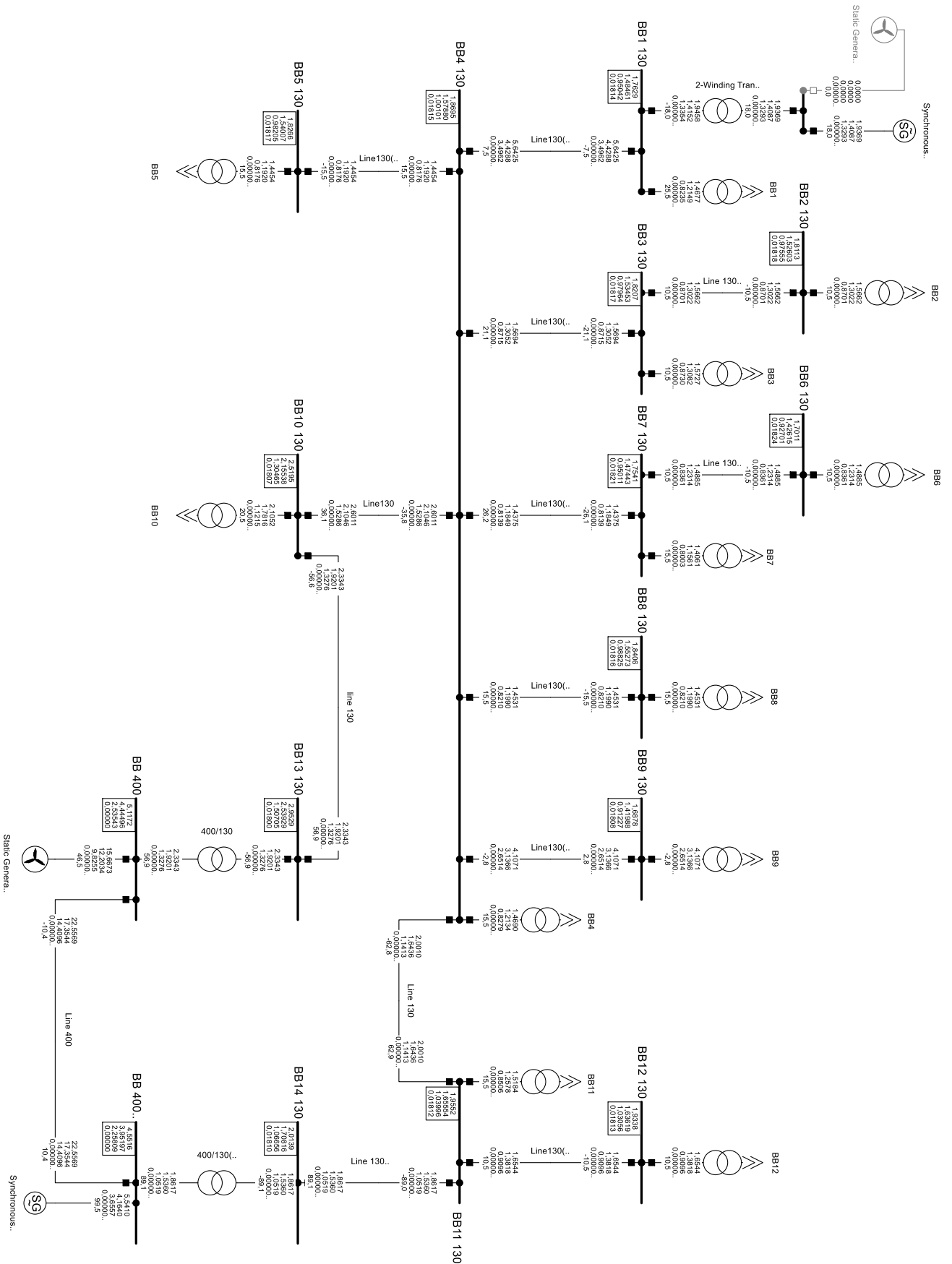
Appendix A:



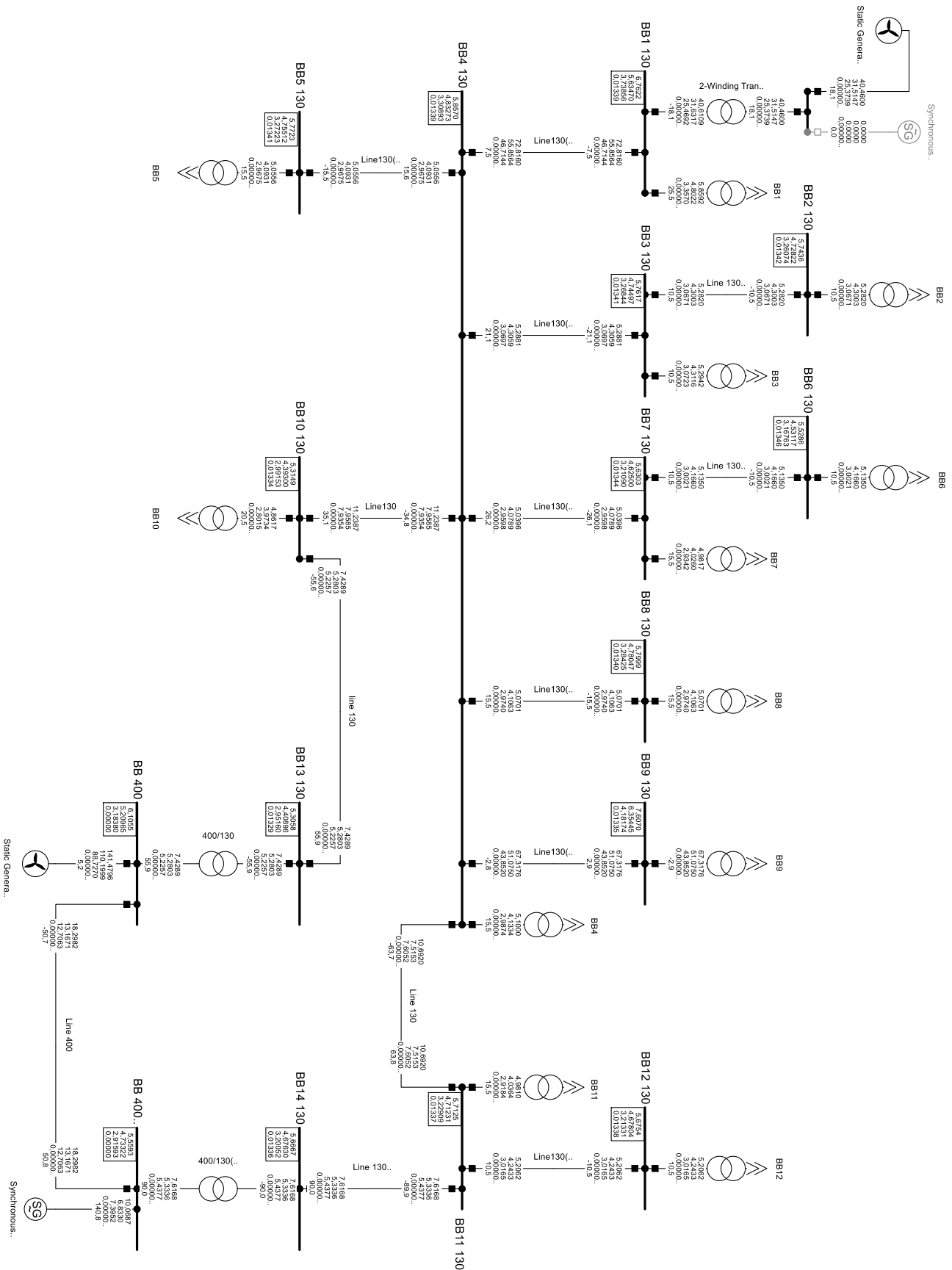
Appendix B:



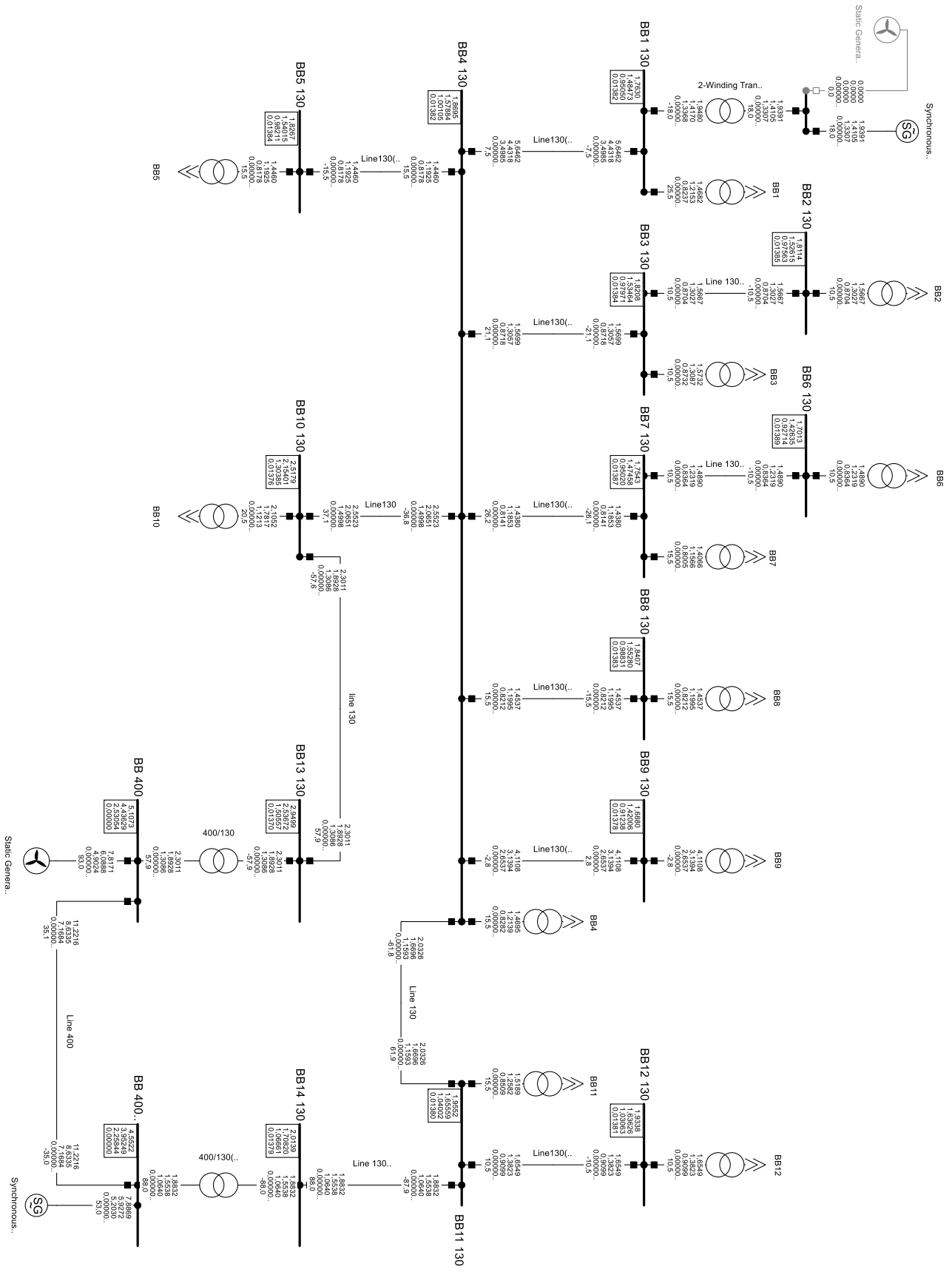
Appendix C:



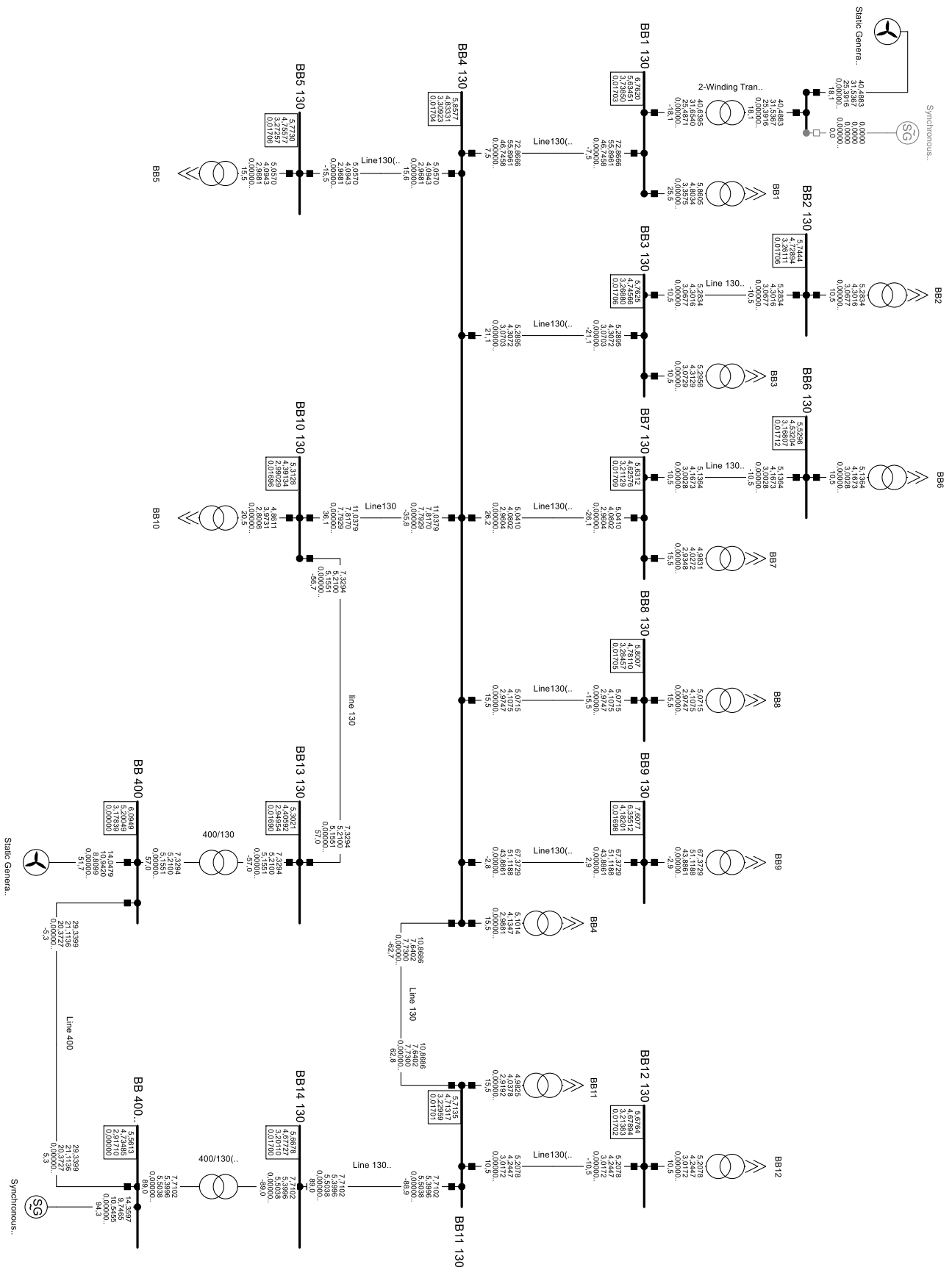
Appendix D:



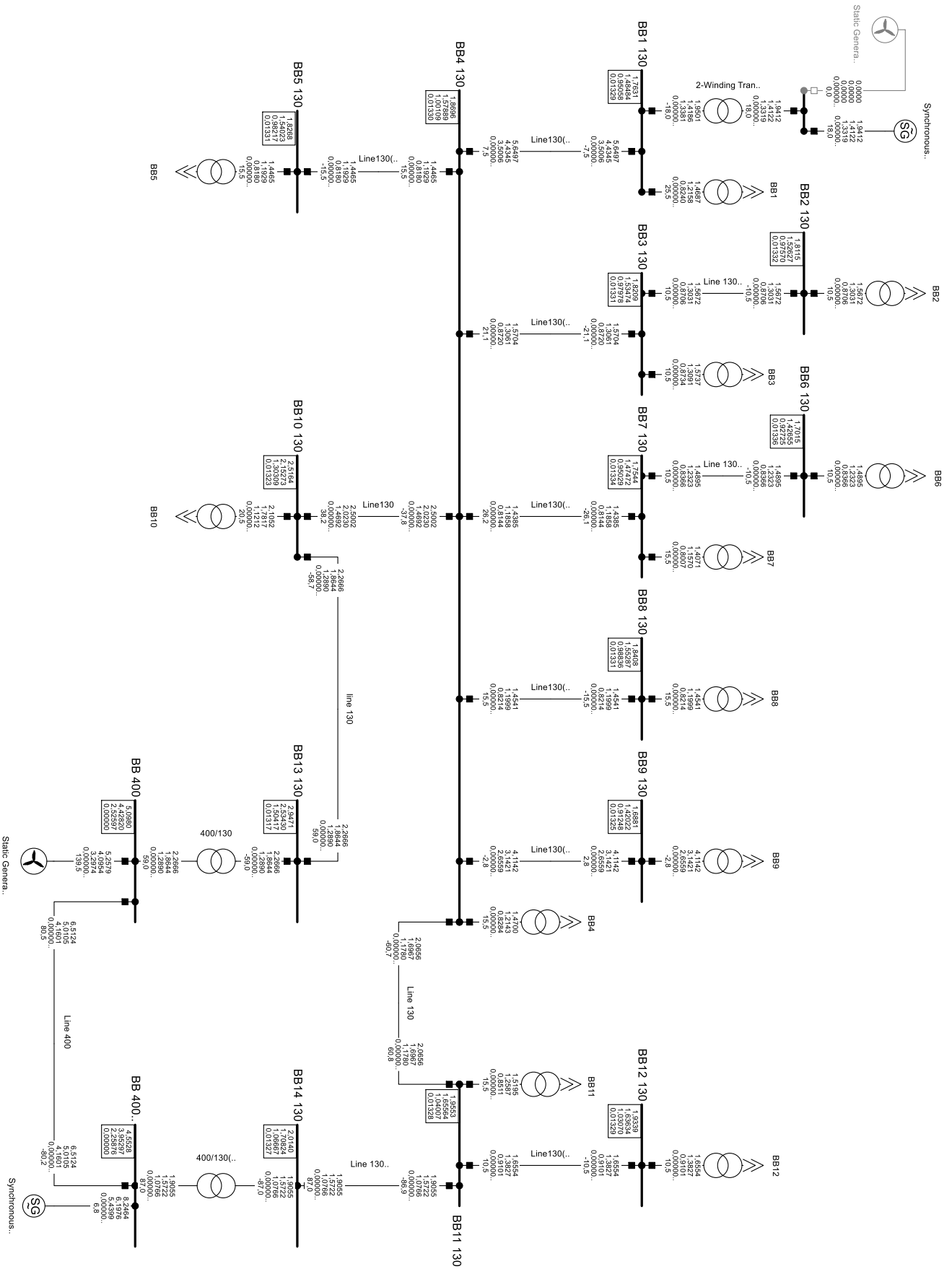
Appendix E:



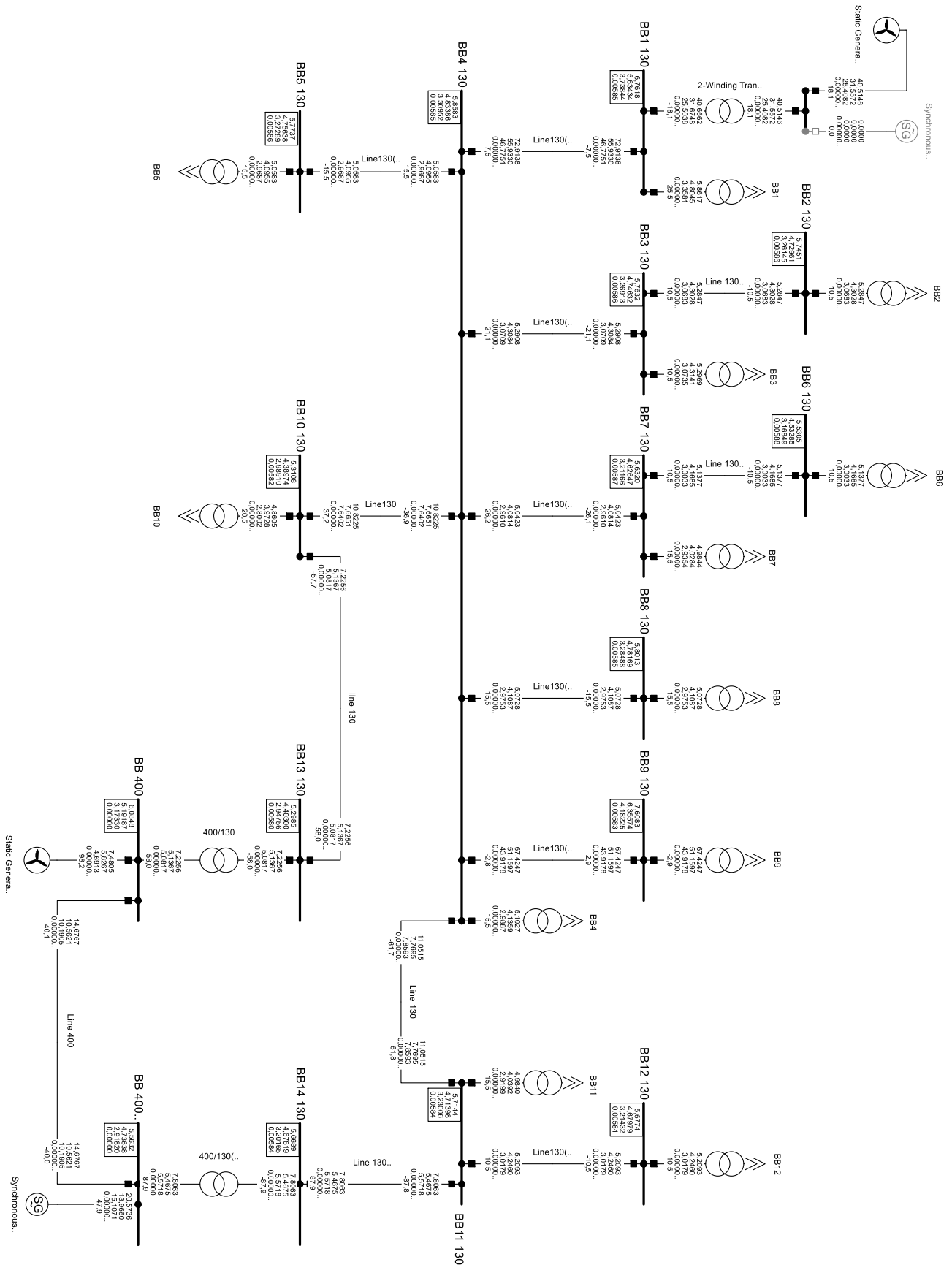
Appendix F:



Appendix G:



Appendix H:



Appendix I:

