Reaktiveffektstyring på transformerstation Tjele

David Gram Maack

Elektrisk Energiteknik, P7, 16-01-2026

Diplomingeninør afgangsprojekt

AALBORG UNIVERSITET

STUDENTERRAPPORT

7. Semester ved AAU Energi
Elektrisk Energiteknik
Pontoppidanstræde 101
9220 Aalborg Øst
https://www.aau.dk/uddannelser/bachelor/baeredygtig-energiteknik-aalborg

Titel:

Reaktiveffektstyring på transformerstation Tjele

Dokumenttype:

Afgangsprojekt

Projekt periode:

29/10/2025-16/01/2026

Studieretning:

Bæredygtig Energiteknik

Elektrisk Energiteknik

Studerende:

David Gram Maack

Undervisere tilknyttet:

Claus Leth Bak

Virksomhedskontakt:

Stefan Frendrup Sörensen

Sider:

Rapport: 39
Dato: 16-01-2026

Abstract

In this project a Reactive power controller will be devoloped and tested.
This is based on Energinet's (updated) strategy to automate the transmission grid more to keep the present stability in the grid, and also remove harmonics from (green) power producers. The 150 kV busbar at transformer station Tjele include both filters, a synchronous condenser and a harmonic distortion source the HVDC-link Skagerrak.
After "researching" the different components and requirments for the RPC. It was found that Skagerrak 1 & 2 would only need 1 filter to remove "sufficient" harmonic distortion, and it was recommended to install a "harmonic distortion meter" to insure harmonic distortion requirments were followed from all sources.
A flowchart of how the real RPC could work and a MATLAB script of a "prototype" was devolped and tested with a model in PowerFactory.
The MATLAB script managed to complete it's main objective of requsting the reactive power to reach within a "dead-zone" in all tests, while following harmonic distortion requirments. It was strongly recommended to "further" devoplop the "trigger", "reactive power estimator" and "harmonic filter requester" before implementing in the real transformer station.

Indholdet af rapporten er frit tilgængeligt, dog, udgivelser (med bibliografi) kan kun ske med aftale med forfatter.

Preface

Dette projekt er lavet af en 7. semester diplomingeniør-studerende og er i forlængelse af et praktikophold ved Energinet. Vejleder ved AAU har været Claus Leth Bak, hvor virksomhedskontakten/vejlederen fra Energinet har været Stefan Frendrup Sörensen. Projektet bruger fortrolige kilder fra Energinet og er ikke offentligt tilgængeligt. Produktet fra projektet vil kun blive simuleret og ikke valideret ved en test i virkeligheden.

Under projektet er MATLAB's Co-pilot/AI [1] blevet brugt til at hjælpe med at programmere, primært ved at blive brugt til slå funktioner op og hvordan de bruges. "Færdiggør sætninger" er brugt i begrænset omfang, ellers er det meste af koden blevet skrevet "manuelt". Chat-GPT [2] er blevet brugt til at brainstorme løsningsforslag og i nogle tilfælde til at tjekke om forståelsen af visse emner er korrekt, eks. omkring modellen for harmonisk støj(Vejleder har da senere været kontaktet for bekræftelse af eksempelvis dette).

Læse Guide

Det antages at læser er bekendt med viden der er undervist t.o.m. 6. semester på AAU bæredygtig Energiteknik med studieretningen Elektrisk Energiteknik. Visse begreber kan blive beskrevet for læseforståelsen.

I dette projekt vil kilder være refereret med et tal. Kilderne er præsenteret til sidst i rapporten. Figurer og tabeller er nummereret i forhold til kapitlet, hvilket betyder det første billede i kapitel 1 har nummeret 1.1, og det andet ville have 1.2. Billedetekst ligger under figurer og ovenfor tabeller hvis dette eksistere.

Software brugt til projektet

- Overleaf LaTeX
- Octave
- Outlook
- Ordbogen.com
- Simulink
- Chat-GPT Web udgave
- Excel
- Inkscape
- Google oversæt
- MatLab og deres Co-Pilot
- PowerFactory

Aalborg Universitet, 16. januar 2026

Contents

1 Motivation **1**
1.1 Projektets indhold 2

2 Videnskgrundlag for projektet **3**
2.1 Reaktiveffektstyring 3
2.1.1 Hvad er Reaktiveffektstyringsenhed 3
2.1.2 Hvad laver en Reaktiveffektstyringsenhed 3
2.1.3 Hvilke krav er der til en Reaktiveffektstyringsenhed 3
2.2 Synkronmaskiner og -kompensatorer 5
2.3 Linje Kommuteret Omformere 6
2.3.1 Hvad er en Tyristor 6
2.3.2 Højspændingsjævnstrømsforbindelserne Skagerrak 1 og 2 6
2.4 Harmonisk Støj og filtre 8
2.4.1 Hvad skaber Harmonisk støj på højspændingsomformer anlæg . . 8
2.4.2 Beskrivelse af harmonisk støj 8
2.4.3 Måling af harmonisk støj 8
2.4.4 Kort gennemgang og info af filtre 9
2.5 Antagelser på grund af manglende information 10
2.5.1 Harmonisk støj fra Skagerrak 1 og 2 10
2.5.2 Hvad er filtrene tunet til 10
2.5.3 Harmonisk filtrering i forhold til standard 12
2.6 Simulering af filtereffekt i MATLAB og Simulink 13
2.6.1 Model af harmonisk støj fra Skagerrak i MATLAB og Simulink . 13
2.7 Skagerrak 1 og 2 bipol model 14
2.7.1 Skagerrak 1 og 2 - Reaktiv Effekt Model 14
2.7.2 Skagerrak 1 og 2 - Harmonisk Støj Model 15
2.7.3 Simulering af effekten fra Skagerrak og filtre 16
2.7.4 Model af filtre koblinger for Skagerrak 1 og 2 18
2.7.5 Måling af harmonisk støj i anlægget 19

3 PowerFactory simulering **20**
3.1 Implementering af vestsektionen af 150kV gården på transformerstation Tjele 20
3.2 Test af implementeringen af 150kV anlægget i PowerFactory 22
3.2.1 Test af last og kilde 22
3.2.2 Test af filtre og kondensatorbatteri 22
3.2.3 Test af synkronmaskine 23
3.2.4 Test af Skagerrak 1 og 2 23
3.2.5 Test når Skagerrak 1 og 2 importerer og eksporterer 500MW med manuel RPC 24
3.2.6 Noter fra test af PowerFactory Model 25

3.3 Reaktiveffektstyringsenhed i PowerFactory 26
3.3.1 Strategi og flowchart for Styringsenheden 26
3.3.2 Beskrivelse af Regulatoren og Estimatoren 31
3.4 Teste om styringsenheden virker 31
3.4.1 Test når den målte værdi er under dødbåndet 32
3.4.2 Test når den målte værdi er over dødbåndet 33
3.4.3 Test når synkronmaskinen er ved at skifte output 34
3.5 Konklusion af PowerFactory tests 35

4 Konklusion på udvikling af Reaktiveffekstyringsenhed 36

Bibliography I

I PowerFactory diagram den vestlige del af 150kV vekselstrømsgården på transformerstation Tjele IV
II PowerFactory simulering med kun last og kilde indkoblet V
III PowerFactory simulering med alle filtre indkoblet VI
IV PowerFactory simulering med synkronmaskinen indkoblet og hvor den forsyner med positivt reaktiveffekt VII
V PowerFactory simulering med synkronmaskinen indkoblet og hvor den forsyner med negativ reaktiveffekt VIII
VI PowerFactory simulering hvor SK12 importerer og yder negativ reaktiveffekt IX
VII PowerFactory simulering hvor SK12 importerer og yder positiv reaktiveffekt X
VIII PowerFactory simulering hvor SK12 eksporterer og yder negativ reaktiveffekt XI
IX PowerFactory simulering hvor SK12 eksporterer og yder positiv reaktiveffekt XII
X PowerFactory simulering hvor SK12 importerer ved maks last og anlægget er blevet manuelt reguleret så tæt på 150kV XIII
XI PowerFactory simulering hvor SK12 eksporterer ved maks last og anlægget er blevet manuelt reguleret så tæt på 150kV XIV
XII PowerFactory simulering hvor hvor der er underspænding og effekfaktoren er lagging XV
XIII PowerFactory simulering hvor der var under underspænding og effektfaktoren var lagging. Effektkontrol XVI
XIV PowerFactory simulering hvor der var under underspænding og effektfaktoren var lagging. Spændingskontrol XVII
XV PowerFactory simulering hvor der er overspænding og effektfaktoren er leading XVIII
XVI PowerFactory simulering hvor der var overspænding og effektfaktoren var leading. Effektkontrol XIX
XVII PowerFactory simulering hvor der var overspænding og effektfaktoren var leading. Spændingskontrol XX
XVIII PowerFactory simulering hvor synkronmaskins referencepunkt blev ændret XXI

Nomenklatur

Symboler

Symbol	Definition	Enhed
I	Strømmen	A
U	Spændingen	V
P	Aktiveffekt	W
Q	Reaktiveffekt	VAr
S	Tilsyneladende effekt	VA
Z	Impedans	Ω
X	Reaktans	Ω
f	Frekvens	Hz
M	Mega	10^6
k	kilo	10^3
RMS	Root Mean Square ——Effektivværdi el. RMS-værdi	$\sqrt{3}$

Slutningen på tabellen

Indeks

Indeks	Definition
h	nr af harmoniske. Grundtonen er når h er 1
$I(t)$	Tidsafhængige (målte) strøm
I_h	RMS el. amplituden af h't harmoniske strøm
$I_{DC-linje}$	Jævnstrømsstrømmen målt fra el. til Omformerstationen SK1 el. SK2 i Tjele
I_{last}	RMS strømmen som går igennem lasten
$I_{last}(f)$	Den frekvensafhængige RMS strøm som går igennem lasten
$I_{filter}(f)$	Den frekvensafhængige strøm som går igennem filteret
$I_{kilde}(f)$	Den frekvensafhængige strøm som fra strømkilden
$U_{DC-linje}$	Jævnstrømsspændingen målt fra el. til Omformerstationen SK1 el. SK2 i Tjele
Z_{last}	Impedansen for lasten
$Z_{filter}(f)$	Den frekvensafhængige impedeans for filteret

Slutningen på tabellen

Akronymer

Akronym	Definition
ABB	Asea Brown Boveri
AAU	Aalborg Universitet
AC	Alternating Current —— Vekselstrøm
ACSR	Aluminium Cable, Steel, Reinforced —— Aluminium Kabel, Stål, Forstærket
AF	Afbryder
DC	Direct Current —— Jævnstrøm
G1	Synkronmaskinen /-kompensatoren på transformerstation Tjele
HVDC	High Voltage Direct Current —— Højspændingsjævnstrøm
LCC	Line-Commutated Converters —— Linje-Kommuteret omformere
RPC	Reactive Power Controll(er) —— Reaktiveffektstyringsenhed
SA	Skinneadskiller
SK	Skagerrak. HVDC forbindelse mellem Norge og Danmark
SK12	Skagerrak 1 og Skagerrak 2 når de arbejder i "Bipol".
THD	Total harmonic distortion —— Samlede harmoniske forvrængning
TJE	Transformerstationen Tjele som er ejet af Energinet
ZA	Harmonisk filter eller kondensatorbatteri
	Slutningen på tabellen

1. Motivation

Som elnettet i Danmark bliver udbygget og kompleksiteten siger, er behovet for automatisk at kunne regulere og styre elnettet stabil, steget. Energinet har i deres "Grøn Energi, Sikker Fremtid - Strategi 2025" [3], bl.a. beskrevet hvordan at behovet for at automatisk kunne drive elnettet er stigende og nødvendig for stabilt og sikker drift at et fremtidligt elnet.

Derudover har Energinet meldt ud, at de ville foretage sig opgaven at installere harmoniske filtre på højspændingsstationer, i stedet for at producenterne for f.eks. solcelle- og vindmølleparkerne skulle gøre dette selv [4]. Dette vil bl.a. gøre det nemmere for nye producenter at koble sig på elnettet, men også undgå forvrængninger, som sker når at flere filtre påvirker hinanden. Se figur 1.1 for hvordan at harmoniske filtre kan se ud.

Figure 1.1: Transformerstation Tjele (TJE) 150 kV filtre (venstre) og 400 kV filter (højre).

Alt dette har til formål at vores ressourcer bliver brugt effektivt og sætte skub på den grønne omstilling, men er der nogen problemer med dette? For at sikre stabil drift af elnettet bruges der bl.a. harmoniske filtre, kondensatorbatterier og synkronmaskiner til at kontrollere spændingen på elnettet. Enheden der styre disse anlæg er ofte kaldet en RPC, som betyder Reactive Power Controller [eng] eller også Reaktiveffektstyringsenhed.

På transformerstation Tjele findes alle tre anlæg, og pga. jævnstrømsforbindelsen til Norge, også kendt som Skagerrak (SK) bliver der skabt harmonisk støj og reaktiveffekt, som ideelt skal fjernes/kompenceres for lokalt. I dette projekt vil der blive undersøgt, hvad betydningen af disse anlæg har for elnettet og RPC'en.

1.1 Projektets indhold

I dette projekt vil der da blive lavet en RPC, som første prioritet kobler filtre ind alt efter "mængden" af harmonisk støj fra Skagerrak 1 og Skagerrak 2, som er en line-commutated converter (LCC)[Eng], som bruger tyristorer. For at systemet kan efterligne omstændighederne i det virkelige anlæg vil der blive indsat en fjern kilde og last. På figur 1.2 kan diagrammet af selve 150kV gården i Tjele ses.

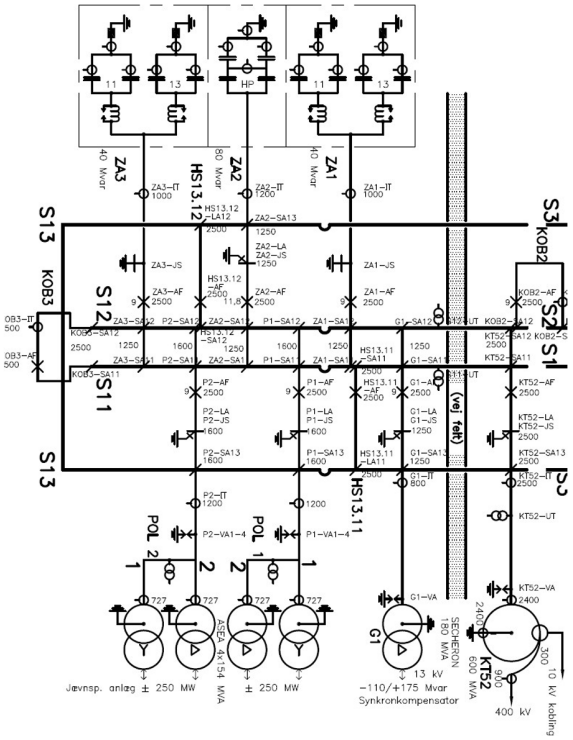


Figure 1.2: Diagram af layoutet på 150 kV gården i Tjele, og det område projektet vil arbejde med. Kilden og lasten vil være inkluderet i senere diagrammer.

RPC'en vil da koble med de harmoniskefiltre og kondensatorbatteriet (ZA1-3), og styre synkronmaskinen (G1) til at nå en justerbar spænding eller reaktiveffektmål. RPC'en vil IKKE styre SK12, og den skal ses som en lokal last/kilde. Som standard case vil der kun blive arbejdet med en samleskinne (S12), dog burde dette ikke have betydning for selve RPC'ens drift.

I projektet vil der da blive gennemgået:

- Viden omkring, RPC'er, filtre (harmoniske), LCC'er og synkronmaskiner.
- Simulere effekterne af filtrene og SK12, og finde ud af hvornår filtrene er krævet.
- Implementere og validere individuelle komponenter i PowerFactory uden RPC.
- Programmere, implementere og validere en RPC i PowerFactory med forskellige cases.

2. Vidensgrundlag for projektet

Inden udviklingen af den reaktiveeffekstyringsenhed, er det vigtigt at kende anlæggene på transformerstation Tjele, samt hvad der er forventet at en RPC skal gøre. Følgende vil blive besvaret i dette kapitel.

2.1 Reaktiveffektstyring

Som nævnt i starten, så omhandler dette projekt udformningen af en RPC til 150kV skinnerne på transformerstation Tjele. Inden dette bliver gjort er det vigtigt at vide:

- Hvad er en Reaktiveffektstyringsenhed?
- Hvad laver en Reaktiveffektstyringsenhed?
- Hvilke krav er der til en Reaktiveffektstyringsenhed?

2.1.1 Hvad er Reaktiveffektstyringsenhed

En reaktiveffektstyringsenhed er et kontrolsystem, som har til opgave at balancere den reaktive effekt og spænding i et bestemt område. Navnet fra engelsk kan oversættes til "reaktiveffekstyringsenhed". Det er en med andre ord en computer der baseret på instrukser og information fra driftsområdet tager beslutninger som opnår et bestemt mål.

2.1.2 Hvad laver en Reaktiveffektstyringsenhed

En RPC modtager målinger fra anlægget, sammenligner med "driftinstruksor" og sender et signal til komponenter ude i anlægget. RPC'er styrer normalt afbrydere til filtre og reaktorer, trinkobler på transformere og reaktorer og "styresignaler" til synkronmaskiner. Kort sagt, så styrer RPC'er alt det som "regulerer" spændingen og reaktiveffekt i dens område. Det er af denne grund praktisk at RPC'en også står for at sikre harmonisk filtrering, da disse filtre også yder reaktiveffekt, og det kan være praktisk at samme enhed "forhandler" prioriteten for alle de andre komponenter.

Prioriten er ofte baseret på hvilke krav der er til RPC'en, samt den udvalgte strategi, som f.eks. kunne være færrest ind og udkoblinger af filtre.

2.1.3 Hvilke krav er der til en Reaktiveffektstyringsenhed

Nu hvor det er beskrevet hvad en RPC er og gør, så kan kravene til RPC'en beskrives. Kravene for RPC'en er beskrevet "Internt" af Energinet, og derfor findes der ikke en kilde til reference.

Kravene til RPC'en er som følgende:

- Spændings(U)- og Reaktiv(Q)-kontrol kan vælges på RPC'en.
- Det skal være muligt at indstille referencen til U- og Q-kontrol.
- Det skal være muligt at justere "dødbåndet" på RPC'en.
- Filtrekobling ift. SK12 operation tager højste prioritet.

De tre første krav er almindelige for RPC'er, men dette 4. krav med filterkobling er vigtigt ift. 150 kV skinner på transformerstation TJE. Et evt. 5. krav er at RPC'en skal undgå unødvendige koblinger, dette kan "afhjælpes" med dødbåndet, men logik mæssigt ved at prioritere synkronmaskinen, som pga. SK1,2 og 3 skal være koblet ind, ift. at undgå kommunteringsfejl på tyristorerne, .

2.2 Synkronmaskiner og -kompensatorer

Synkronmaskiner er elektriske motorer, som ofte bliver brugt til at sende og optage effekt på elnettet. Disse maskiner er ofte forbundet direkte med elnettet, ofte for at synkronisere en masse maskiner. Synkronmaskinens statorfelt bliver påvirket at elnettet det er forbundet med, hvor at roterens magnetfelt er skabt af enten et permanent magnet-system eller en jævnstrøm igennem viklinger [5].

Adskillesen om noget er en synkronmaskine eller synkronkompensator, er om den forsyner både aktiv- og reaktiveffekt eller kun reaktiveffekt [5]. På transformerstationen Tjele findes en synkronkompensator som også bliver benævnt som "G1". Denne er bruger jævnstrøm stil at styre rotorens magnetfelt, og *er* direkte koblet på højspændingsnettet. Pga. dette kan G1 bruges til at regulere den reaktiveeffekt, og alt efter styringen og konstruktionen til G1 så kan den regulere denne reaktiveeffekt ret præcist.

Der er en note, som er meget vigtig for G1. I modsætning til filterne som "bare" kan kobles ind, så skal G1 være koblet ind inden den kan begynde at forsyne med reaktiveffekt. Dette skyldes at for en synkronmaskine el. -kompensator af G1's størrelse, så vile startstrømmen fra hvile være "stor", hvilket ikke er økonomisk praktisk at designe efter. I stedet for findes der til G1 en mindre motor, som kan "langsomt" øge omdrejningerne indtil at frekvensen og fasevinklen matcher/er inden for "grænserne", hvorefter at G1 er koblet ind og kan nu forsyne med reaktiv effekt.

Derudover så giver G1, når den er koblet ind, noget inerti og stabilitet til elnettet, som LCC'erne har brug for ift. "stabil drift". I dette dokument vil G1 blive benævnt som både synkronmaskinen og synkronkompensatoren, selvom at det er en synkronkompensator. Et billede af G1 kan ses i figur 2.1.

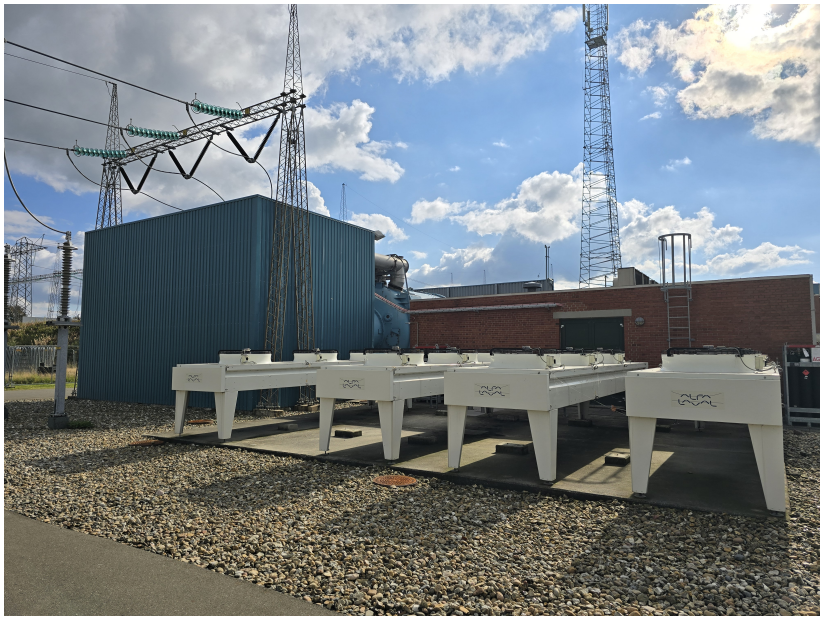


Figure 2.1: Billede af synkronkompensatoren på transformerstation Tjele, med køleanlægget forrest i billedet

2.3 Linje Kommuteret Omformere

Inden en model er givet af SK12, er det relevant at vide hvordan at line- commutated converters" LCC'er og tyristorer fungerer. Det ikke nødvendigt at gå i dybden, men relevant ift. udformningen og nogle af de antagelser og modeller der bliver lavet.

Som navnet lidt dækker, så er disse typer konvertere styreret af et kommunterings-"signal" [6], hvilket for SK12 er elnettet i Danmark. Med andre ord, en LCC skal have en eksisterende reference på elnettet, hvilket betyder at LCC anlæg IKKE vil kunne spændingssætte elnettet og følger i stedet for elnettet.

2.3.1 Hvad er en Tyristor

Tyristorer er generelt den familie af omformere der nævnes, når der nævnes LCC'er. Del af at være en LCC er at det er nødvendigt med et kommumenteringssignal. Når signalet er over en "grænseværdi", så begynder tyristoren at lede. Problemet ved tyristorer er, at når de leder, så vil strømmen de leder også fungere som "tænd" signalet. Måden dette generelt bliver imødekommet er ved at konfigurationen af tyristorerne og kredsløbet de er forbundet til "slukker" for den. Hvis strømmen igennem en tyristor er under "holdestrømmen", så vil de ikke længere lede. Der vil dog som for bl.a. MOSFETS være en mindre "krybestrøm" [6].

Kommunenteringssignalet vil være "baseret" på vekselstrømmen på elnettet. Ved 3-faset vil der da "altid" være en spænding, som er "større" end de andre faser. Pga. af dette kan man f.eks. når omformeren skal fungere som ensretter, indstille signalet sådan at den kun tænder for tyristorne i den "største" fase, hvilke bl.a. pga. måden tyristorers "tænd/sluk" fungerer, lader én skabe en relativ stabil jævnstrøm [6].

Det primære problem med måden at tyristorer omformer på, er at spændingen "altid" vil være høj, når at tyristoren leder. Dette betyder kort, at strømmen vil starte fra et "lavt" stadie, og skal "indhente" spændingen. Dette er den generelle og simplificeret grund til at LCC anlæg og i forlængelse tyristor-omformere vil "producere" relativt meget induktiv effekt, da strømmen altid vil være "forsinket" og producere en reaktiveffekt udover den aktiveeffekt [6]. Et simpelt "overslag" på reaktiveffekt fra et tyristorbaseret HVDC anlæg er omkring 60% af den aktiveeffekt. Altså, hvis der overføres 100MW, så bliver der også "overført" 60MVAr, dog findes der dokumentation på dette for SK12, hvilket præsenteres i sektion 2.7.1.

Bl.a. pga. at tyristorer "hakker" i strømmen, bliver der skabt harmonisk støj. Dette er beskrevet mere i sektion 2.4.1. Dette sætter bl.a. kravet om at SK12 skal have "sufficient" filtrering.

2.3.2 Højspændingsjævnstrømsforbindelserne Skagerrak 1 og 2

På transformerstation Tjele, findes HVDC forbindelserne Skagerak 1 og Skagerak 2, som går fra Danmark til Norge. De to HVDC forbindelser kan arbejde sammen og fungere som bipol og vil primært blive beskrevet ved SK12. For ikke at overkomplicere, vil projektet primært fokusere på bipolen SK12 og ikke kigge på SK1 og SK2 som individuelle forbindelser.

SK12 er en HVDC forbindelse som bruger tyristorer til at "styre" strømretningen. Ved at ændre i bl.a. tændvinklen er det muligt at ændre i mængden af strøm der overføres på SK12.

Pga. måden SK12 fungerer, så bliver der skabt harmonisk støj og reaktiv effekt. Den harmoniske støj findes der pt. ikke en tilgængelig model for, men den reaktive effekt findes en model i dokumentationen for SK12, mere om dette i section 2.7.1. I figur 2.2 kan et billede af DC-siden på SK12 ses.

Figure 2.2: Billede af DC-siden på Skagerrak 1 og 2 på transformerstation Tjele.

2.4 Harmonisk Støj og filtre

Før det er muligt at kigge på effekten af filtrene, er det nødvendigt at forstå hvad de gør og hvad de fjerner. Inden dette, kigges der på hvad harmonisk støj er, og hvad det skabes af.

2.4.1 Hvad skaber Harmonisk støj på højspændingsomformer anlæg

Den simple forklaring på harmonisk støj på HVDC anlæg og mange andre elektriske systemer er "varierende last." Pga. måden mange omformere opererer, så bliver der "tændt" og "slukket" for "indgangen". Dette påvirker f.eks. "bølgeformen" på strømmen fra en spændingskilde. Dette vil ofte kunne ses i f.eks. at sinuskurven på vekselstrømmen og spændingen vil gå fra at være "pæn" til at hav en masse spidser. Hvis denne støj er stor nok, kan det resultere i større strømme, og at kontrolsystemer som afhænger af en "pæn" sinuskurve, ikke fungerer som forventet, og i værste fald stopper eller går i stykker.

Den lidt mere tekniske forklaring, er at Flourier transformationen af "måden" omformere bliver ledende på, har dele i højere frekvenser, som selv efter inklusionen af kondensatorer og spoler m.m. stadigvæk vil være synlige på output signalet og i forlængelse en ny Flourier transformation [6].

2.4.2 Beskrivelse af harmonisk støj

Harmonisk støj kan beskrives som Fourier transformationen af et støjfyldt signal og der kan skelnes mellem støj som er et heltal multipel af grundtonen (50 Hz), og det som ikke er et heltal multipel. I dette projekt vil der kun kigges på visse heltal multipel af 50Hz. Den simple Formel der vil blive brugt kan ses i ligning 2.4.2. [7] [8].

$$Signal(t) = \sum_1^h A_h * \sin\left(50\text{Hz} * h * t\right)$$

Hvor A_h er amplituden af støjen og den fundementale (h = 1) og "h" er harmoniske nr. "h". Det skal nævnes at standarden kigger mere på ulige harmoniske som ikke kan divideres med 3 uden rest. Der vil ikke blive forklaret nærmere hvorfor dette er.

2.4.3 Måling af harmonisk støj

I dag findes der udstyr som kan måle både strømmen, spændingen og give amplituden på de harmoniske. Der findes også THD-værdien for måling af harmonisk støj, som bruger RMS-værdien af de harmoniske og giver et tal for hvor støjfyldt strømmen eller spændingen er som helhed. Da dette projekt arbejder med et eksisterende anlægs harmoniske filtre, er det mere relevant at kigge på amplituden af de harmoniske som bliver filtreret. I stedet for vil RMS-værdien for det harmoniske støj bruges som bl.a. beskrevet i IEC standarden [8], kan bruges til at evaluere om et anlæg filtrerer filtrere nok harmonisk støj.

Standarden nævner bl.a. hvordan selve grænserne for anlæggene kan sættes, men anlæg kan, bl.a. fra Energinet, blive pålagt yderligere krav, hvis der er behov for

dette. Der vil i sektion 2.5.3 blive forklaret, hvad grænserne for harmonisk støj vil blive sat for SK12 og i forlængelse RPC'en.

2.4.4 Kort gennemgang og info af filtre

Hvert af de 2 filtre til SK12 består af 2 parallelle band-stop filtre i en LCR konfiguration. Disse er tunet til at fjerne bestemte harmoniske fra elnettet. Et diagram af filtrene kan ses i figur 2.3. Værdierne for filtrene præsenteres ikke her, men ville kunne udleveres ved anmodning.

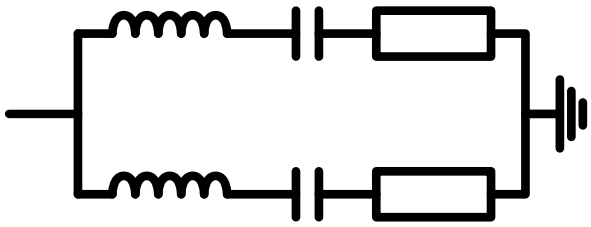


Figure 2.3: Layoutet for filtrene til SK12 ZA1. Det skal noteres at ZA3 er ens med ZA1

Når filtrene skal implementeres i PowerFactory vil de blive set som kondensatorbatterier. Dette vil blive kort forklaret i næste sektion. I stedet for, så vil viden om hvilke harmoniske filtrene fjerner blive brugt til at bestemme hvilken "type" omformer SK12 og i forlængelse, hvordan den harmoniske støj fra SK12 ser ud. Mere om dette i næste sektion, hvor nogle af antagelserne omkring anlægget bliver udforsket.

2.5 Antagelser på grund af manglende information

Som nævnt tidligere, er det desværre pga. utilgængeligt data, nødvendigt at lave nogle antagelser, hvis det skal være muligt at forstå, modellere og efterfølgende lave en RPC som ville virke i virkeligheden.

2.5.1 Harmonisk støj fra Skagerrak 1 og 2

Da det desværre ikke er muligt at få, eller måske lige så relevant, måle harmonisk støj fra SK12, da konsekvenserne af en stor harmonisk støjkilde kunne være store, er det nødvendigt at give et bud på hvordan denne "rene" støj ser ud. Derudover er det ikke muligt at anskaffe dokumentation på harmonisk støj eller lign. på SK12, hvilket betyder, at det er nødvendigt at lave nogle antagelser.

Til at hjælpe med dette, kigges der på 2 ting:

- Hvilke harmoniske er filtrene kalibreret efter?
- Hvad "burde" den harmoniske støj være når støjen er filtreret væk?

Hvis disse to er kendt, så er det muligt at antage hvad harmonisk støj SK12 udsender, og mere præcist, antage amplituden på denne harmoniske støj er.

Dog bliver det pga. disse antagelser også nødvendigt at gøre "grænserne", for hvornår filtrene skal kobles, justerbare. Med andre ord "ekstra" krav til RPC'en bliver:

- Variable grænser for hvornår filtre skal ind og udkobles som følge af SK12 strømoverførsel.
- Mulighed for at justere "dødbåndet" på filtregrænserne.

Disse tilføjelser ville evt. gøre det muligt at justere RPC'en i tilfælde mere detaljeret information er tilgængeligt.

2.5.2 Hvad er filtrene tunet til

Da opsætningen og værdierne på spoler, kondensatorer og modstande er kendt til filtrene ZA1 og ZA3 (de er identiske), er det muligt at lave en frekvensrespons på filtrene. Dette gøres ved at regne impedansen for filtrene ved alle frekvenser i et spænd. Industristandarden for harmonisk støj er 40. el. 50. harmoniske, hvilket er 50 * 50Hz (2500Hz) [9], og når der skal laves frekvensrespons, er dette spændet det gøres i. Filtrene sidder i layoutet som kan ses i figur 2.4:

Ved at udregne den samlede impedans for filtrene, så er det muligt at lave et bodeplot af filtret, hvor det mest relevante er "gains" ved de forskellige frekvenser, da et negativt "gain" ville filtrere den harmoniske ved denne frekvens. Ved at "manuelt" køre analysen i MATLAB er følgende bodeplot skabt som kan ses i figur 2.5:

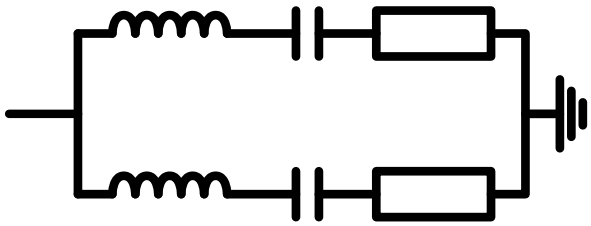


Figure 2.4: Layoutet for filtrene til SK12 ZA1. Det skal noteres at ZA3 er ens med ZA1

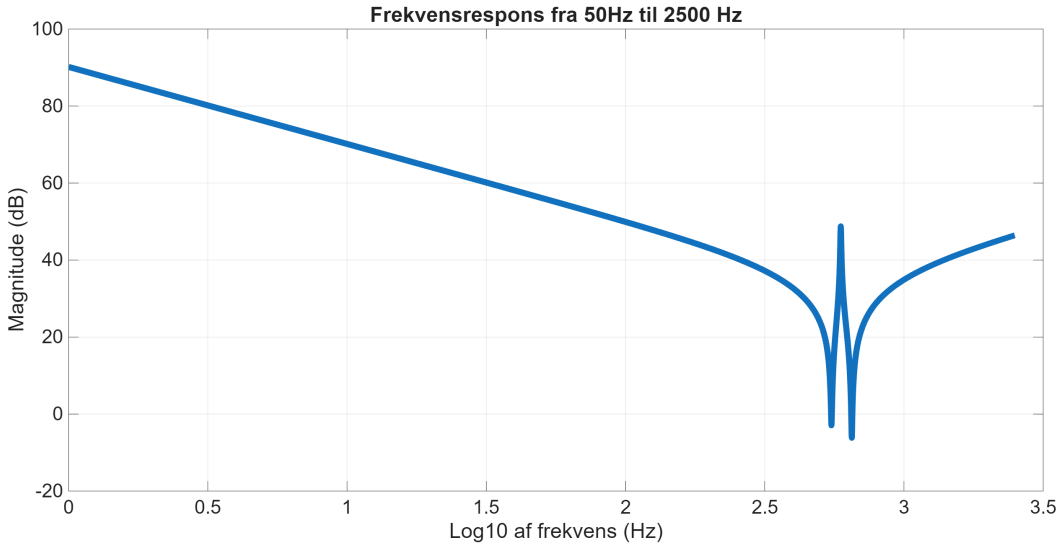


Figure 2.5: Frekvensrespons af ZA1. Responsen ville være ens for ZA3

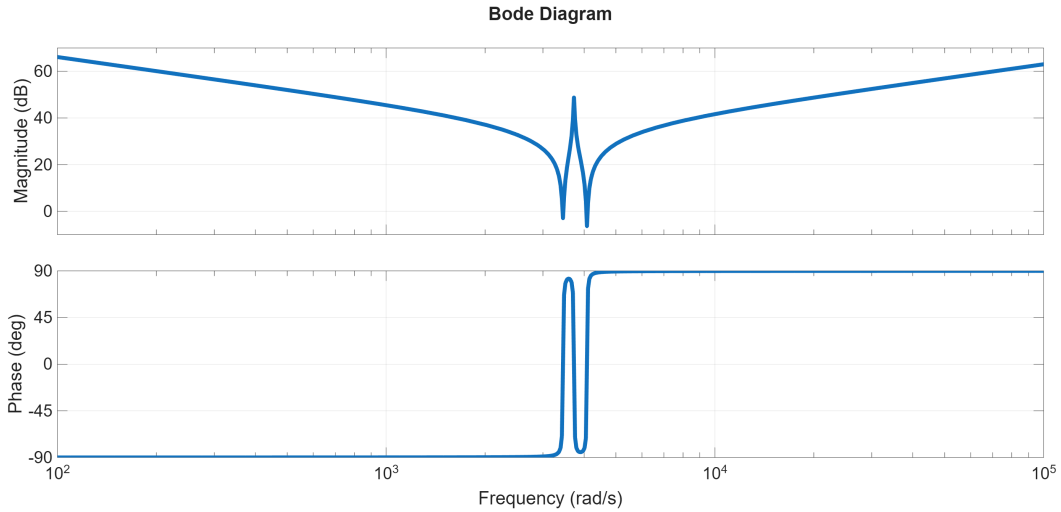


Figure 2.6: Bodeplot af overføringsfunktionen for ZA1. Bodeplottet ville være ens for ZA3

For at dobbelttjekke at frekvensresponsen er lavet korrekt, så er overføringsfunktionen for filteret blevet lavet, hvorefter at "bode" funktionen i MATLAB er blevet brugt, som laver et bodeplot af filteret. Resultatet af at bruge "bode" kan ses i figur 2.6.

Det kan aflæses at frekvenserne 550Hz og 650Hz bliver filtreret. Dette svarer til 11. og 13. harmoniske. Det er muligt at tjekke om dette matcher hvad der er forventet for et anlæg som SK12. I et dokument fra ABB kan det aflæses at udformningen af anlægget

vil gøre det til en "12 puls ensretter". Ved at kigge på figur 4.8 i dette dokument, kan det aflæses at de harmoniske som en 12 puls ville skabe er størst i 11. og 13. [9]. Dette dokument kan da også senere refereres når en model for de harmoniske fra SK12 skal laves senere.

2.5.3 Harmonisk filtrering i forhold til standard

Da det ikke er muligt at finde den standard som filtrene på SK12 skal filtrere ift. dokumentationen, så bruges i stedet for den nyere standard fra 2008 "IEC TR 61000-3-6:2008 ED2", som ifølge Dansk Energi. er den som bruges for anlæg over 50MW [10]. Denne standard vil da være det, som RPC'en skal overholde ved drift.

I IEC-standarden kan det aflæses at amplituden af 11. og 13. harmoniske burde være under 3% af grundtonen [8], hvilket gælder for både spændingen og strømmen. Pga. måden bl.a. SK12 vil blive repræsenteret, vil der blive lagt vægt på harmonisk støj på strømmen. Table 5 fra IEC dokument kan grænserne for harmonisk støj på strømmen aflæses i tabel 2.1 i dette dokument .

Table 2.1: Tabel 5 fra [8], oversat til dansk og forsimplet

Harmonisk order h	5	7	11	13	> 13
Harmonisk strøm emission grænse af $\frac{I_{\text{harmonisk nr.}h}}{I_{grundtonen}}$ [%]	5	5	3	3	$\frac{500}{h^2}$

Disse værdier vil da blive brugt til at validere om der er nok filtrering. Der kan generelt bare kigges på om 11. eller 13. harmoniske er mere end 3% af grundtonen. Indsat i figur 2.7 er et billede af det harmoniske filter til SK12.

Figure 2.7: Det ene af de harmoniske filtre ZA3 (højre side) til SKagerrak 1 og 2. I midten til venstre er kondensatorbatteriet ZA2

2.6 Simulering af filtereffekt i MATLAB og Simulink

Nu hvor kravene og de harmoniske produceret af SK12 er bestemt, så er det nu muligt at kører en simulation, hvor det kigges på først ufiltreret, modellen for filteret og til sidst hvordan at filtrerne påvirker signalet med harmonisk støj. Målet her er da at lave en model for hvornår at filtrene skal kobles ind og ud som funktion af effekt/strømmen overført af SK12. Denne model vil da have højest prioritet for hvornår at filtrene skal kobles med. Det er da RPC'ens opgave at reagere på en hensigtsmæssig måde, hvor den kobler med færrest mulige komponenter.

Målet kan da ses som en "funktion" som fortæller om ingen, en eller begge filtre skal kobles ind.

2.6.1 Model af harmonisk støj fra Skagerrak i MATLAB og Simulink

For at kunne tjekke om filter modellen virker, er det først vigtigt at have en model af grundtonen og harmonisk støj som følge af effekten/strømmen overført af SK12. Der findes pt. ikke en tilgængelig model af dette, og det er ikke praktisk at køre SK12 uden filter og lave målinger herfra. I stedet for er det muligt at lave nogle antagelser om den opførsel. I et dokument fra ABB, bliver der præsenteret en graf for harmonisk støj fra en "12 puls converter", som matcher filtrene på anlægget [9]. Ved at bruge denne graf er det muligt at skabe en "simpel" model af støj fra SK12.

2.7 Skagerrak 1 og 2 bipol model

Som nævnt tidligere, så er SK12 en LCC med tyristorer. SK12 er en af de ældste stadigvæk i drift, hvilket kan skabe nogle problemer ift. dokumentation og simulering. Det dokumentation der er skaffet for SK12 beskriver kun relationen mellem effekten el. også bare strømmen overført af SK12 og den reaktive effekt optaget/skabt. Der findes dog ikke nogen model for harmoniske skabt af SK12, og i stedet for er det nødvendigt at lave nogle antagelser. Disse antagelser vil ikke være 100% præcise, og læser bør tage dette ved forhold, hvis de prøver at gentage instruktioner.

2.7.1 Skagerrak 1 og 2 - Reaktiv Effekt Model

Ved at læse dokumentationen [11], findes der ligninger til at udregne den reaktive effekt som funktion af bl.a. den overførte strøm. Da dokumentet er "fortroligt" vil ligningerne i deres helhed ikke blive præsenteret her. I dokumentet findes og grafer som viser den aktive og reaktive effekt. Målet i denne sektion er da at kunne genskabe disse grafer.

En "vigtig" note er at dette dokument er på svensk og fra 1974/92, og der kan være fejl i dokumentationen selv eller i måden det er blevet læst på. Fremgangsmåden for at udregne den aktive og reaktive effekt er aflæst til således:

- Udregn resistivt spændingsfald i konvertertransformeren.
- Udregne tomgangsspændingen i inverteren
- Udregning af kommuteringsmarginalen
- Udregning af spændingen over inverteren
- (En mulig fejl i dokumentationen) Spændingen over ensretteren sættes "manuelt" sådan at styringsvinklen er 15° ved fuld last.
- Styringsvinklen udregnes
- Cosinus-forholdet mellem styringsvinklen og "overlapvinklen" udregnes
- Overlapvinklen findes ved numerisk at teste alle værdier mellem 0° og 90°
- Den reaktive "impedans" findes
- Aktive- og reaktiveeffekt udregnes

Som det kunne læses så skal meget udregnes for at kunne finde den aktive og reaktive effekt, dog skal det noteres at formlen for aktiveffekt (se ligning 2.1), ikke afhænger af nogle af de værdier der blev udregnet. Med andre ord, alt dette er *kun* for at udregne den reaktiveeffekt.

$$P = I_{DC-linje} * U_{DC-linje} \tag{2.1}$$

Følgende graf (se figur 2.8) kan laves ved at øge strømmen igennem jævnstrømlinjen fra 50A til 1000A, da 50A el. 5% af maksimale strøm er minimumsstrømmen:

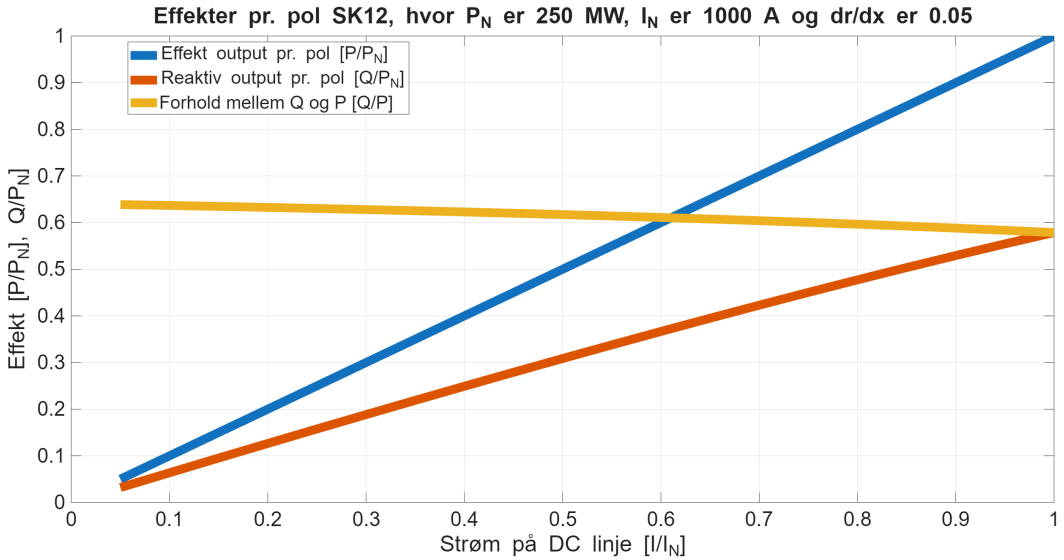


Figure 2.8: Graf af aktiv- og reaktiveffekt samt forholdet mellem de to ifølge den overførte jævnstrøm "I"

Det kan bl.a. her ses at forholdet mellem den aktive- og reaktiveeffekt er omkring 0,6, hvilket følger hvad HVDC LCC'er normalt laver ift. reaktiveffekt. Denne graf følger også ca. kurven for reaktiveffekt i dokumentationen, dog umiddelbart ikke 100%. Baseret på at modellen matcher ca. det i dokumentationen og forholdet er ca. 60%, vurderes modellen er være retvisende for SK12.

Dette betyder med andre ord at SK12 ville ved fuldlast (500MW) "lave" ca. 290 MVAr og minimumlast (12,5MW med 1 pol) ca. 8 MVAr. Når den reaktive effekt for SK12 udregnes vil denne model blive brugt, men evt. kan 60% af den aktive effekt bruges, hvis en retvisende værdi hurtigt skal bruges.

2.7.2 Skagerrak 1 og 2 - Harmonisk Støj Model

Fra et dokument fra ABB [9], baseret på vurdering af layout, og hvilke harmoniske frekvenser filtrene til SK12 er tunet til, har det været muligt at bestemme at SK12 er en 12-puls omformer/ensretter. Derudover findes der en graf i dokumentet fra ABB, som viser amplituden af de harmoniske som procent af fundementalen. Ved at analysere grafen i et billede-redigeringsprogram (Inkscape), kan følgende værdier for amplituderne af de harmoniske som procent af grundtonen fremskaffes, og kan ses i tabel 2.2.

Table 2.2: Amplituderne aflæst fra grafen i dokumentet fra ABB omkring harmonisk støj [9]. I_h er amplituden/RMS af den harmoniske strøm og I_1 er amplituden/RMS af grundtonen

Harmoniske nr.	5.	7.	11.	13.	17.	19.	23.	25.
I_h/I_1[%]	1,67	1,09	5,95	3,5	0,33	0,20	1,05	0,88

Læser bør bemærke at for overskueligs-skyld, vil I_1 være ligmed den reelle effektoverførsel fra anlægget, altså hvis en last skal have 100 A, så vil $I_1 = 100$A. Dette betyder at amplituden af strømmen igennem lasten vil kunne være større end hvad lasten ville modtage uden harmonisk støj.

2.7.3 Simulering af effekten fra Skagerrak og filtre

For at simulere effekten, af hvordan filtreret påvirker harmonisk støj, bruges MATLAB og Simulink. I Simulink bliver der præsenteret og visuliseret, hvordan at det harmoniske signal fra SK12 bliver implementeret, og hvordan at filteret påvirker harmoniske støj, når kun filteret er forbundet. Dette vil IKKE tage forhold til at SK12 har en minimum effekt på 25MW. I figur 2.9 kan det ses hvordan at signalet vil blive simuleret. Vær opmærksom på selve Simulink modellen i figur 2.9 repræsenterer, hvordan at den harmoniske støj bliver modelleret i MATLAB.

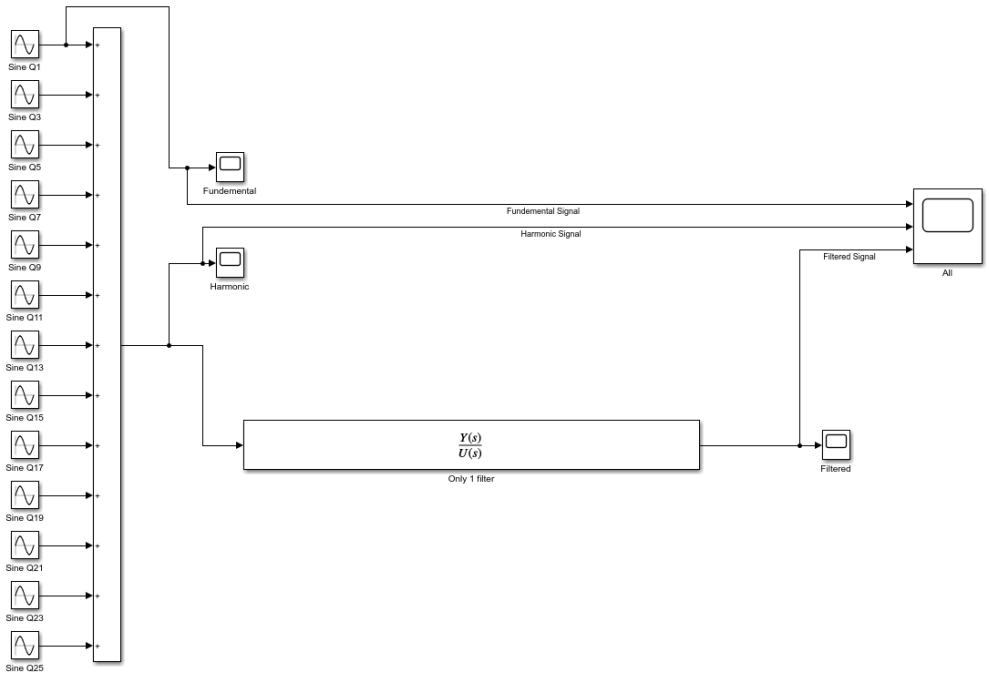


Figure 2.9: Et billede af Simulink-modellen.

Læser bør notere at fasevinklen ikke vil være anderledes ift. grundtonen, hvilket potentielt ville være anderledes, end hvis der blev lavet en Flourier-analyse af den rigtige spænding og strøm på højspændingsnettet på transformerstation Tjele.

I denne model blev der også kigget på, hvordan det harmoniske signal så ud, og hvordan at overføringsfunktionen for filteret interagerer med det harmoniske signal. Grafer for forholdsvis, grundtonen, harmonisk signal-model og det filtreret signal er indsat i figur 2.10.

Det kan ses her, at hvis filteret er koblet i serie med SK12, så ville den fjerne "alt" harmonisk støj, og det kan ikke længere ses på kurven. Baseret på tidligere bodeplot og frekvensrespons af filteret, vurderes det denne model ville være retvisende for filterets respons. Problemt med at bruge overføringsmodellen på denne måde, er bl.a. at det ikke direkte kan aflæses hvad amplitutden af harmonisk støj er, og for ikke at bruge tid på at lave en Flourier analyse af signalet, kan der i stedet for bruges samme metode som blev brugt til frekvensresponsen.

For at tjekke effekten af filteret ved bestemte belastninger, vil der blive kigget på

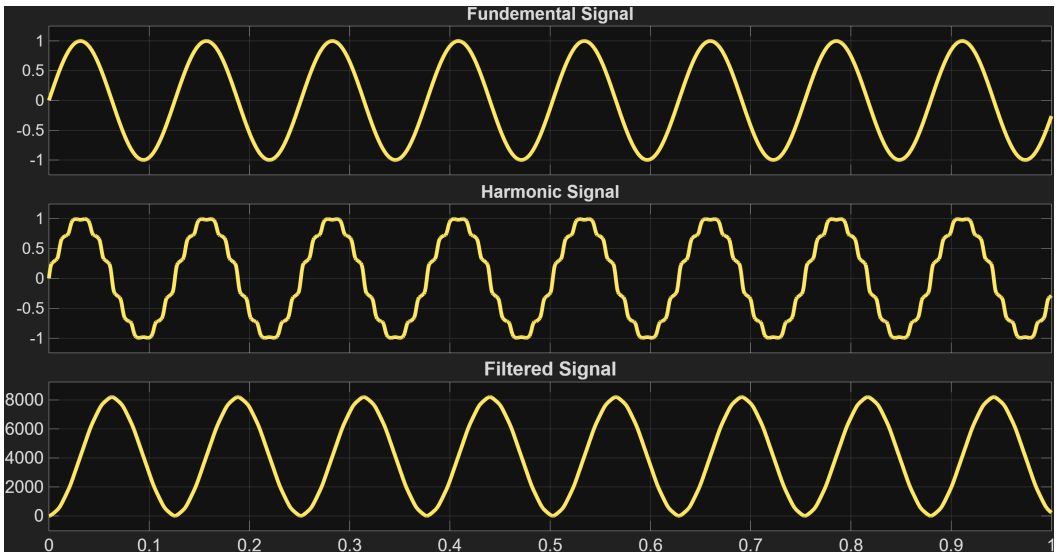


Figure 2.10: Billede af en fundemental sinuskurve, et signal baseret på den harmoniske model fra sektion 2.7.2, og signalet når det har været igennem overføringsfunktionen for filteret.

amplituden af de forskellige harmoniske strømme over filteret og lasten selv. Dette vil blive gjort lidt på samme måde som når der laves frekvensrespons af filteret, ved at udregne impedansen af filteret ved bestemte frekvenser. Pga. at modellen af det harmoniske støj fra SK12 kun er baseret på amplituderne af bestemte harmoniske, vil der ikke blive kigget på strømmene mellem de harmoniske frekvenser.

For at udregne strømmene til filteret og lasten, vil der blive brugt simple strømudregninger. I kredsløbet skal det ses som at filteret og lasten sidder i parallel, og spændingen over disse antages at være ens. Det skal noteret at for at spændingen over filteret og lasten matcher det som det evt. vil være ude i anlægget, vil kilden sende "ekstra" strøm for at kompensere for dette. Der vil heller ikke blive kigge på aktiv og reaktiv effekt i dette eksempel, og der vil kun blive kigget på amplituderne af impedansen for filteret. For lasten vil impedansen være statisk og ikke ændre sig.

For at udregne strømmene over lasten og filteret bruges følgende:

$$I_{kilde}(f) = I_{filter}(f) + I_{last}$$

For at udregne strømmene ved forskellige frekvenser antages det at spændingen over filteret og lasten er ens. Pga. dette kan følgende formler i ligning 2.2 bruges for at udregne strømmene igennem filtreret og lasten:

$$I_{filter}(f) = I_{kilde}(f) * \frac{Z_{last}}{Z_{filter}(f) + Z_{last}} \Leftrightarrow I_{last}(f) = I_{kilde}(f) * \frac{Z_{filter}(f)}{Z_{filter}(f) + Z_{last}} \quad (2.2)$$

Ved at udregne impdansen for filteret ved hver frekvens, og justere amplituden af strømmen sådan at spændingen over filteret ved 50Hz er 150kV, kan følgende graf for strømmene ved en 50MW last laves og kan ses i figur 2.11.

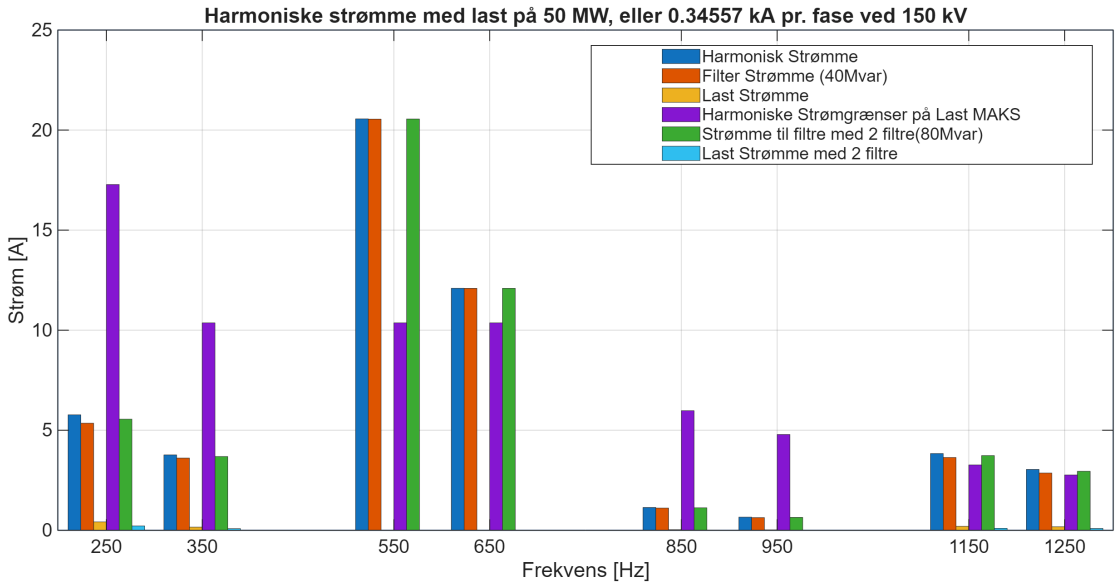


Figure 2.11: 50MW frekvensanalyse. Med bare et filter, så er last strømmene næsten 0 på alle harmoniske frekvenser. Den Lilla bar (nr 4.) er den maksimale amplitude strømmen må have ifølge tabel 2.1.

Som det kan ses, så er de harmoniske strømme over lasten næsten nul i 11. (550Hz) og 13. (650Hz) harmoniske, som baseret på kravene for harmonisk filtrering være tilpas filtrering. Udover 11. og 13. så kan det også ses at filteret har en effekt på filtrering af de højere frekvente 23. (1150Hz) og 25. (1250Hz) harmoniske, som uden filteret ville have været over grænsen for harmonisk støj.

Til næste frekvensanalyse sættes lasten til 500 MW, som ville være den maksimale effekt SK12 ville kunne importere og eksportere. Resultatet fra frekvensanalysen kan ses i figur 2.12.

Som det igen kan ses, så er 11. og 13. harmoniske over lasten ikke i nærheden af grænsen for harmonisk støj. Dog kan det ses at i 23. og 25. så er den harmoniske støj tættere på grænsen, og effekten af at have 2 filtre kan også tydligere ses her. Det bør noteres at uden et eller 2 filtre, så ville kravene for harmonisk filtrering ikke blive fuldt, da SK12 som standard sender mere harmonisk støj end det er "tilladt".

Baseret på frekvensanalysen vurderes det at ét filter ville være nok til at fjerne nok harmonisk støj fra SK12 ved alle outputs. Dette betyder også at der altid skal være ét filter for at SK12 må køre ift. harmoniske filtreringskrav.

2.7.4 Model af filtre koblinger for Skagerrak 1 og 2

Pga. simuleringen, er det nu muligt at vide hvornår at filtrene er nødvendige som funktion af strømmen. Dog er det relevant at nævne at det måske er mere praktisk kun at kigge på størrelsen af 11. og 13. harmoniske støj, da disse er størst. Dette ville også ligge på linje med kravene fra IEC standarden [8].

Dog kan det ses fra simuleringerne af filtrene, at en "simpel" antagelse bare **et** af

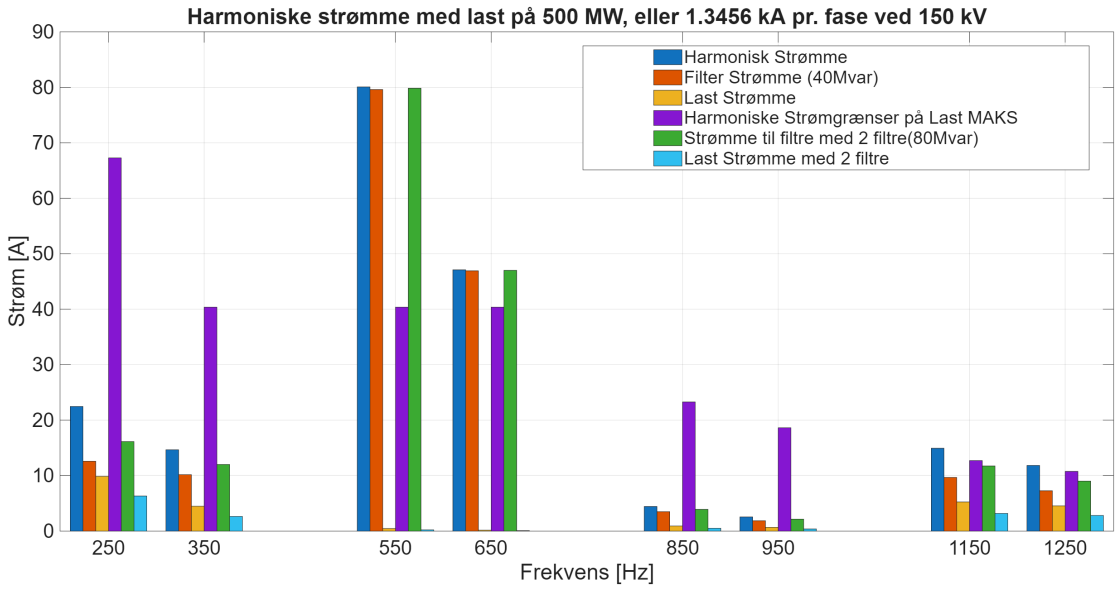


Figure 2.12: 500MW frekvensanalyse. I denne kan last strømmene ses, og for f.eks. 250Hz den næsten lige så stor som den til filteret. Derudover kan effekten af 2 filtre også nemmere ses her. Den Lilla bar (nr 4.) er den maksimale amplitude strømmen må have ifølge tabel 2.1.

filtre skal være koblet ind for opfylde krav om filtrering. Derudover kunne det ses, at det andet filter umiddelbart ikke havde nogen negativ effekt, bl.a. baseret på Simulink modellen. Det vil derfor være muligt at bruge det andet filter til reaktiveffekt-kompensering.

2.7.5 Måling af harmonisk støj i anlægget

I stedet for at lave en antagelse af harmonisk støj fra SK12, så kunne man i stedet for, installere en måler der måler harmonisk støj på samleskinnerne. Ved hjælp af dette ville man være mindre afhængig af en præcis model og kunne filtrere både harmonisk støj fra SK12 men også andre steder på elnettet. Det ville dog stadigvæk have 1. prioritet ift. kobling af filtrene så lidt ændring til RPC'en ville skulle laves. Når RPC'en designes laves der plads til at kunne bruge et "signal" som allokerer et el. flere harmoniske filtre til at fjerne harmonisk støj.

3. PowerFactory simulering

Som nævnt i introen, så bliver PowerFactory brugt til at verificere at RPC'en virker. PowerFactory er et simuleringsværktøj, som kan simulere elektriske kredsløb og analysere på flere forskellige måder, herunder harmoniske-, kortslutnings- og load flow-analyse.

Tidligere i MATLAB blev der lavet analyse af harmonisk støj, som kunne konkludere at med kun SK12 som støjkilde, så ville et harmonisk filter være nok til at nå harmonisk filtreringskrav. Med dette noteret, så ift. at teste en RPC, så ville load flow analyse være mest relevant at lave på systemet, da denne ville give spændingen på samleskinnen og effektstrømninger.

3.1 Implementering af vestsektionen af 150kV gården på transformerstation Tjele

Før der kan laves en load flow analyse af anlægget, så skal det først implementeres i PowerFactory. Det skal noteres at ikke alt på diagrammet vil være relevant for RPC'en på dette nivau, og nogle elementer vil ikke blive implementeret. Diagrammet for 150kV gården på transformerstation Tjele kan ses i figur 3.1.

Baseret viden omkring hvordan det virkelige anlæg ser ud, kan følgende antagelser laves:

- En streg "/" er en skinneadskiller og har forkortelsen "SA"
- Et kryds "X" er en afbryder og har forkortelsen "AF"
- En positiv MVAr-værdi er for kondensator-last
- Der findes 2 spændingsniveauer, hvor det mindre nivau er 13kV og findes lokalt ved synkronmaskinen.

Disse noter bruges da til at bestemme, hvordan at anlægget skal forbindes, og hvad kapaciteten for synkronmaskinen er. Da der kun kigges på load flow, så ekskluderes jordslutterne, da de kun burde være koblet ind når feltet er ude af drift og spændingsløst (mere omkring hvordan at RPC'en håndterer dette i sektion 3.3.1). Derudover da der kun kigges på load flow, så implementeres filtrene som (mindre) kondensatorbatterier.

For at kunne have et spændingsfald på samleskinnen, så placeres en kilde og last på den anden side af luftlinjer. Da PowerFactory skal have værdier for selve luftlinjen, så er "Falcon", som er en ACSR fra Power System Analysis & Design [12], blevet

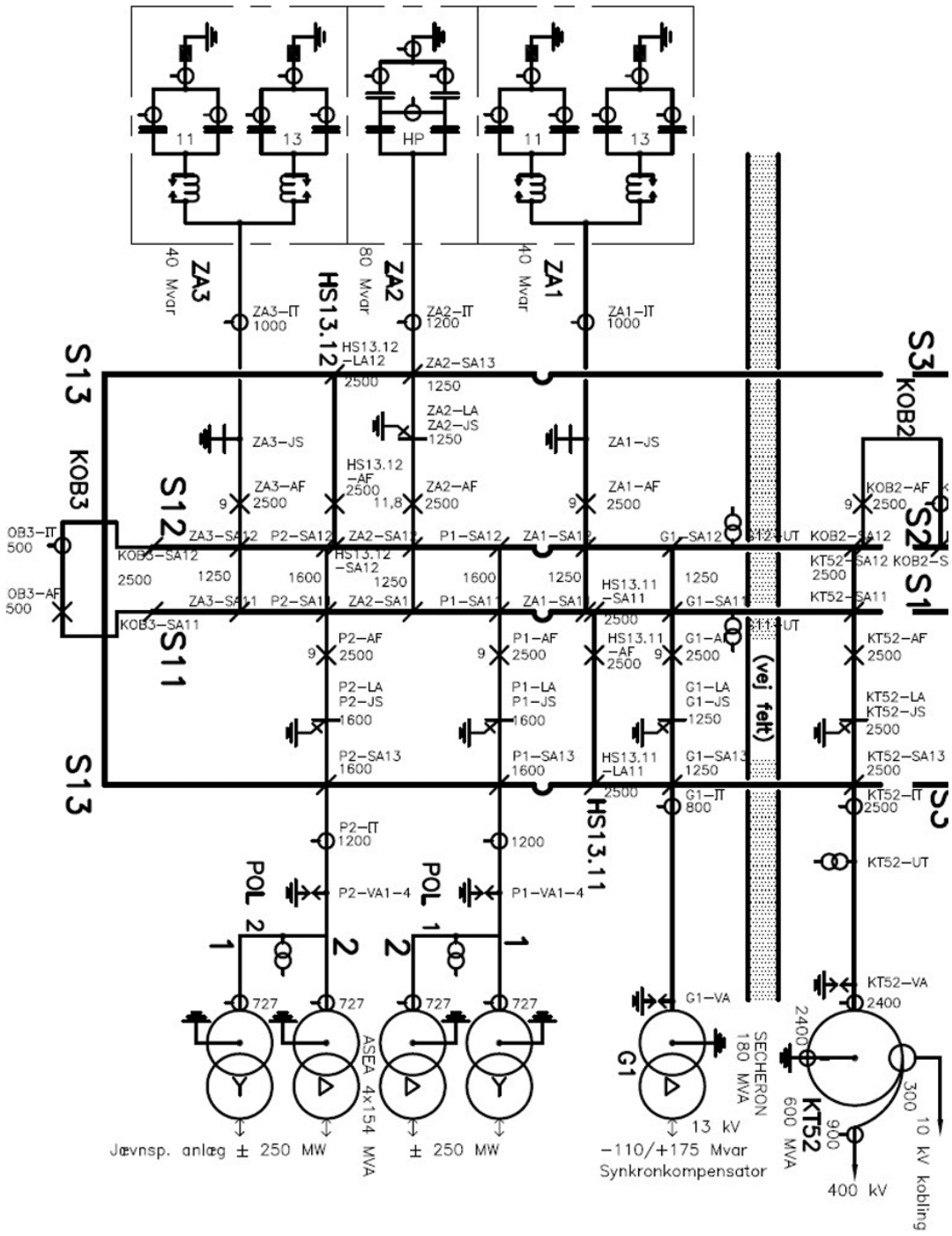


Figure 3.1: Diagram af hvordan 150kV vekselstrømgården er konfigureret på den vestlige side af anlægget

brugt, da den har den største kapacitet. Alle (relevante) komponenter implementeres til 150kV, selvom at anlægget i virkeligheden har en højere spænding.

Med disse noter så kan følgende implementering af anlægget laves i PowerFactory. Dog kan selve modellen ikke vises i denne sektion pga. af størrelsen, og i stedet for er disse inkluderet til sidst i dokumentet. Modellen af 150kV vekselstrømsgården i PowerFactory kan findes i sektion I.

Inden RPCen kan blive testet, så skal implementeringen først testes at alle komponenterne virker som forventet, bl.a. ift. reaktiveffekt og spændingen på samleskinnen.

3.2 Test af implementeringen af 150kV anlægget i PowerFactory

Før at RPC'en kan testet på anlægget i PowerFactory [13], så skal det først tjekkes at komponenterne reagerer som forventet. Dette gøres ved at koble skinneadskillere og afbrydere ind, ligesom man ville gøre i det virkelige anlæg. For at simplificere processen vil kun 1 af skinnerne blive brugt, men der burde ikke være forskel på hvilken skinne der bruges.

3.2.1 Test af last og kilde

Som første test, tjekkes det at kilden og lasten reagerer som forventet. Dette gøres ved at koble adskiller og afbryder for begge til samleskinne S12. Noter at resten af simuleringerne sker på samleskinnen S12. Spændingen sættes til 150 kV, hvis andet ikke er nævnt, så skal spændingen antages at være 150kV fra kilden. Lasten sættes til 100MW og 10MVAr. Pga. størrelsen af billedet fra PowerFactory så sættes det til sidst i dokumentet i sektion II. Beskrivelse af resultatet fra simuleringen er som følger:

- Linjen fra last til samleskinnen er 10 km med 3 luftlinjer
- Linjen fra kilden til samleskinnen er 1 km med 1 luftlinje
- Spændingen på samleskinnen er 149,9 kV hvor den var 150kV fra kilden
- Lasten er sat til 200 MW og 10 MVAr.
- Kilden forsyner med 200,5 MW og 12,8 MVAr

I testen er afstanden på luftlinjerne ikke længere end 11 km i alt, hvilket betyder at spændingsfaldet ikke er så stort. Derudover kan det ses at kilden fungerer som "slack-bus", og forsyner den effekt der skal til for at lasten modtager den korrekte effekt. Testen ses som en succes og den generelle model for kilde og last bruges i resten af testene.

3.2.2 Test af filtre og kondensatorbatteri

Nu hvor det er bekræfet at kilden og spændingen kan simuleres, og at der er et spændingsfald over linjerne, så kan hvert af de 3 ZA'er indkobles. Et billede af når alle tre er indkoblet kan ses i sektion III. Følgende beskriver nu systemet:

- Lasten er nu sat til 100 MW og 10MVAr.
- Spændingen på samleskinnen er nu 150,3kV
- Kilden forsyner nu med 100,2 MW og -149,6 MVAr

Det kan ses at spændingen stiger når at et eller flere af filterne kobles ind, hvilket matcher teorien om effektregulering. Læser bør notere fortegnene på de reaktiveeffekter, når at synkronmaskinen testes.

3.2.3 Test af synkronmaskine

For at teste synkronmaskinen, er filtrene koblet ud og det testes hvad der sker når synkronmaskinen forsyner med en reaktiveffekt med positivt fortegn og negativt fortegn. Resultaterne kan ses i sektion IV og V. For testen med positiv MVAr fra synkronmaskinen beskriver følgende systemet:

- Lasten er på 100MW og 10MVAr
- Samleskinnespændingen er nu på 150kV
- Kilden forsyner nu med 100,1 MW og -31 MVAr
- Synkronmaskinen forsyner med 42 MVAr
- Ingen af ZA'erne er koblet ind

Som det kunne ses, så var det muligt at justere spændingen til 150kV. Nu laves testen hvor synkronmaskinen forsyner med en negativ reaktiveffekt resultatet kan ses i sektion V. Følgende beskriver nu systemet:

- Lasten er på 100MW og 10MVAr
- Samleskinnespændingen er nu 149,8kV
- Kilden forsyner med 100,1 MW og 53 MVAr
- Synkronmaskinen forsyner nu med -42MVAr

Som det kunne ses i disse test, så kunne synkronmaskinen justere den reaktiveeffekt den yder, hvilket kan bruges til at justere effektfaktoren el. bare mængden af reaktiveffekt der bliver importeret fra kilden. Det kan ses at modellen for synkronmaskinen virker og opfører sig som forventet. I de næste tests, tjekkes det om modellen for SK12 fungerer som forventet.

3.2.4 Test af Skagerrak 1 og 2

Nu hvor alle ressourne for RPC'en er testet, så er det relevant at teste modellen af SK12 i PowerFactory. Baseret på modelering af reaktiveffekt fra SK12, så blev det fundet at den reaktive effekt var ca. 60% af den aktive effekt. Der bliver testet ved en effekt på 25MW ved både import og eksport. Her var det vigtigt at teste hvad fortegnene på den aktive- og reaktiveeffekt på SK12 betød. Resultaterne for testene kan ses i sektionerne VI, VII, VIII og til sidst IX. Resultaterne fra testene kan beskrives ved følgende:

- Spændingen på eksport testene er lavere end på import testene
- Hvis den reaktive effekt er positiv svarer det til kondensatorlast
- Hvis den reaktive effekt er negativ svarer det til spolelast

Fra testene kan det ses at "operationen" af SK12 kan medvirke til at spændingen på samleskinnen er højere eller lavere, alt efter om der er import el. eksport af aktiveffekt. Dette matcher generel teori om spændingstab på tranmissionslinjer. Derudover kunne det ses at den reaktive effekt på SK12 skal altid have negativt fortegn, da SK12 kun vil "skabe" reaktiveffekt hvor strømmen er forskinket ift. spændingen.

Til sidst testes det, hvordan anlægget kan kompencere for SK12, når den kører ved fuld import el. eksport på 500 MW.

3.2.5 Test når Skagerrak 1 og 2 importerer og eksporterer 500MW med manuel RPC

Til sidst så bliver det testet når SK12 importerer og eksporter 500MW. En problemstilling opstod dog, da systemet skulle balanceres, så ville det ikke "konvergere", da spændingsfaldet på linjerne ville være for stort, hvis der ikke blev kompenseret med reaktiv effekt inden da. Dette blev fikset ved at tilføje reaktiveffekt til systemet, hvilket allerede var planen for testen. Dette betyder dog at der ikke findes et "før" billede af systemet.

I testen vil målet da være at prøve at ramme en spændingen på 150kV på samleskinen. I den første test importeres 500 MW fra SK12. Resultatet fra simuleringen kan ses i sektion X. Følgende beskriver nu systemet:

- Lasten er nu på 500MW og 10 MVAr
- Samleskinnespændingen er på 150kV
- Kilden forsyner med 2,2 MW og 12,3 MVAr
- Fra anlægget sendes der til lasten 502,2 MW og 23,4 MVAr
- SK12 forsyner med 500 MW og -300 MVAr
- Alle ZA'er er indkoblet
- Synkronmaskinen er indkoblet og forsyner med 155MVAr

Som det kunne ses i denne test, så var det muligt med eksisterende ressourcer i anlægget at opnå en spænding på 150kV på samleskinnen. Det kunne også ses, fordi at anlægget og SK12 forsynede med effekt, så skulle kilden næsten ikke forsyne effekt. Anlægget, og i forlængelse de observationer der blev lavet, matcher teorien om effektregulering og elektriske anlæg.

Til den næste test vil SK12 i stedet for eksportere 500 MW. Da dette betyder at SK12 nu er en last, vil den fjerne last blive frakoblet, og det er nu kun SK12, kilden skal forsyne med effekt. Målet er igen, at se om det er muligt at opnå en spænding på 150kV på samleskinnen med tilgængelige ressourcer. Resultatet fra simuleringen kan ses i sektion XI og følgende beskriver anlægget.

- Den fjerne last er frakoblet
- Spændingen på samleskinnen er 149,9 kV
- Kilden forsyner med 500,7 Mw og -25,9 MVAr
- Samleskinnen modtager fra kilden 500MW og -29,9 MVAr
- SK12 eksporterer og "modtager" 500 MW og -300 MVAr
- Alle ZA'er er indkoblet
- Synkronmaskinen er indkoblet og forsyner med 175 MVar, hvilket er maksimum
- Den reaktive effektbalance er følgende: Ca 335 MVAr fra komponenterne
- Synkronmaskinen mister 5MVAr i "transformeren" fra 13kV til 150kV.

I denne test var det ikke muligt at justere spændingen på samleskinnen til 150kV, selvom alle tilgængelige MVAr ressourcer blev brugt. Derudover kunne det også antages at pga. den store mængde strøm der blev transmitteret, så var spændingsfaldet på luftlinjen større end i de andre tests. I dette tilfælde ville RPC'en ikke kunne opnå målværdien af 150kV med de tilgængelige ressourcer. I dette tilfælde burde RPC'en sende en advarsel til operatøren, om at den ikke kan nå målværdien med alle tilgængelige ressourcer.

Testene ses da som succes, da de både viser at det er muligt at opnå en målværdi når SK12 importerer 500 MW, men også da de viser at der kan forekomme situationer, hvor at RPC'en ikke ville kunne løse problemet med tilgængelige ressourcer.

3.2.6 Noter fra test af PowerFactory Model

Det lykkedes i alle testene at vise at komponenterne virkede som forventet, herunder luftlinjerne og SK12. Modellen ses som gyldig til at teste en RPC og validere den. En note til systemet der blev testet med, er at længden af luftlinjerne var ikke særlig langt, sammenlignet med de afstande som der potentielt kunne mødes i virkeligheden, f.eks. så er transformerstation Ferslev ca. 50 km fugleflugt fra transformerstation Tjele [14], og transformerstation Revsing (Viking Link) er ca. 110 km fra Tjele. Derudover så har 150 kV luftlinjerne ofte mere end en linje (ledning) pr. fase.

Testene ses som succes, og for fremtidlige test kan luftlinjeafstandene ændres til andet en 10 og 1 km, og antallet af linjer(ledninger) kunne ændres til andet en 1 linje.

3.3 Reaktiveffektstyringsenhed i PowerFactory

Nu hvor det er bekræftet at PowerFactory modellen kan simulere anlægget og de forskellige komponenter, kan arbejdet med at lave selve RPC'en begynde. Men inden da, skal der nævnes nogle begrænsninger.

Da selve anlægget skal simuleres i PowerFactory, og dermed beslutningerne for RPC'en, så ville det være mest praktisk at implementere RPC'en direkte i PowerFactory. Men pga. tidsbegrænsninger er det ikke muligt til dette projekt. I stedet for laves flowdiagrammet som RPC'en vil følge og et MATLAB script som kan følge diagrammet.

Måden det vil foregå på, er at MATLAB scriptet vil få information omkring omstændighederne i anlægget, og hvad den har tilgængeligt. Herfra skal scriptet/RPC'en vælge den mest optimale løsning inden for en bestemt strategi. Dette betyder praktisk at RPC'en afhænger af at de rigtige informermationer bliver indtastet i MATLAB, hvilket er noget, som en RPC i virkeligheden ville møde. "Løsningen" RPC'en vælger vil blive outputtet og skal herefter implementeres i PowerFactory. Når RPC'en bliver testet, vil denne fremgangsmåde ikke blive beskrevet, da den er impliceret af selve metoden RPC'en er implementeret i dette projekt.

3.3.1 Strategi og flowchart for Styringsenheden

Inden selve flowdiagrammet for RPC'en kan beskrives, vil stragtegien blive beskrevet og er som følger:

- ALTID sørge for at harmoniske filtreringskrav bliver opfyldt, hvis dette ikke er muligt advar operatøren.
- Alt efter om den er indstillet til Q el. U kontrol sørge for at den målte værdi er indefor dødbåndet
- Dødbånd og målværdien er indstillet af operatøren
- Hvis værdien er udenfor dødbåndet prøve at ramme målværdien så tæt som muligt
- Hvis det ikke er muligt at ramme indefor dødbåndet prøve strategien der lader den komme tættest på og advare operatøren
- Baseret på nuværende afvigelse fra målet lave en anmodning om reaktiveffekt der opfylder førnævnte.
- Lave overblik over tilgængelige MVAr ressourcer og vælge den der kommer tættest på anmodningen.
- Prioriterer Synkronmaskinen, Kondensatorbatteri og til sidst filter hvis der findes et "dødt løb" mellem 2 løsninger.
- Synkronmaskinen vil som standard kun bruge et margin af den tilgængelige kapacitet, hvis andre løsninger ikke er indenfor dødzonen brug fuld kapacitet.

- Hvis synkronmaskinen tager for lang tid, tjekke om resterende løsninger kommer tættere på målet.
- Hvis løsningen ændres opdatere synkronmaskinens referencepunkt
- Hvis synkronmaskinen er ved at ændre output og overskyder målpunktet, opdatere referencepunktet til nuværende output på synkronmaskinen.
- Sende advarsel til operatøren hvis at den målte værdi er udenfor "arbejdsområdet"
- Konsant måle ændringer i anlægget og estimere påvirkningen tilgængelige ressourcer har, f.eks. når et filter kobles ind for at filtrere harmonisk støj
- Tertiært system som vurderer om regulator og estimator er for "aggressive"

Stragtegien prioriterer færest mulige koblinger og harmonisk filtrering. Dette betyder at hvis f.eks. 40MVAr (kondensator) er anmodet, og synkronmaskinen og et filter kan forsyne dette, så bliver synkronmaskinen valgt først. Dette betyder også at der vil være cases, hvor at synkronmaskinen modarbejder delvist eller fuldt den reaktive effekt fra filtre og kondensatorbatteriet. Dog hvis synkronmaskinen er ved at ændre den reaktive effekt den yder, så vil kondensatorbatteriet og filtrene blive brugt i stedet for. Dette er f.eks. hvis at synkronmaskinen tager for lang tid om at nå målet ifølge en "Regulator". "Regulatoren" vil IKKE blive designet i dette projekt.

Derudover, for at finde ud af hvor mange MVAr RPC'en skal anmode, så vil forskellen i reaktiveffekt eller spændingen blive ganget med et estimat, som hele tiden skal opdateres af en "Estimator". Da spændingen og "omstændighederne" ude på elnettet vil påvirke, hvad hver MVAr fra kondensatorbatteriet, filtrene og synkronmaskinen vil påvirke med i virkeligheden. "Estimatoren" vil IKKE blive designet i dette projekt.

Ud fra dette kan følgende flowchart for RPC'en og i et hvis omfang MATLAB scriptet laves, som kan ses i figur 3.2.

Dette flowchart beskriver den første Halvdel af de afhængige processer i RPC'en. Læser bør bemærke de stiplede kasser som deler flowchartet i 3 områder. Det første område med målinger fra anlægget finder ud af hvor mange MVAr RPC'en skal anmode om. Det andet område med den gule boks finder ud af hvilker MVAr ressourcer er tilgængelige og putter disse på en liste. Den tredje kasse er hvor at RPC'en finder ud af, hvilke af ressourcerne ville reducere størrelsen af anmodningen mest. Med andre ord så vælger RPC'en *kun* en af mulighederne. Går vi nu til anden halvdel af de afhængige processer forsætter vi i figur 3.3.

Flowchartet er her blevet delt op i 2 zoner. I den første, forsættes fra første halvdel. Her finder RPC'en ud af, om den er færdig med at "allokere" ressourcer. Her prøver den af projekterer mængden af ressourcer vha. Estimator-værdien, og tjekker om denne projekterede værdi er indenfor dødbåndet. Hvis dette ikke er sandt så tjekker den om der er mere den kan gøre ved enten:

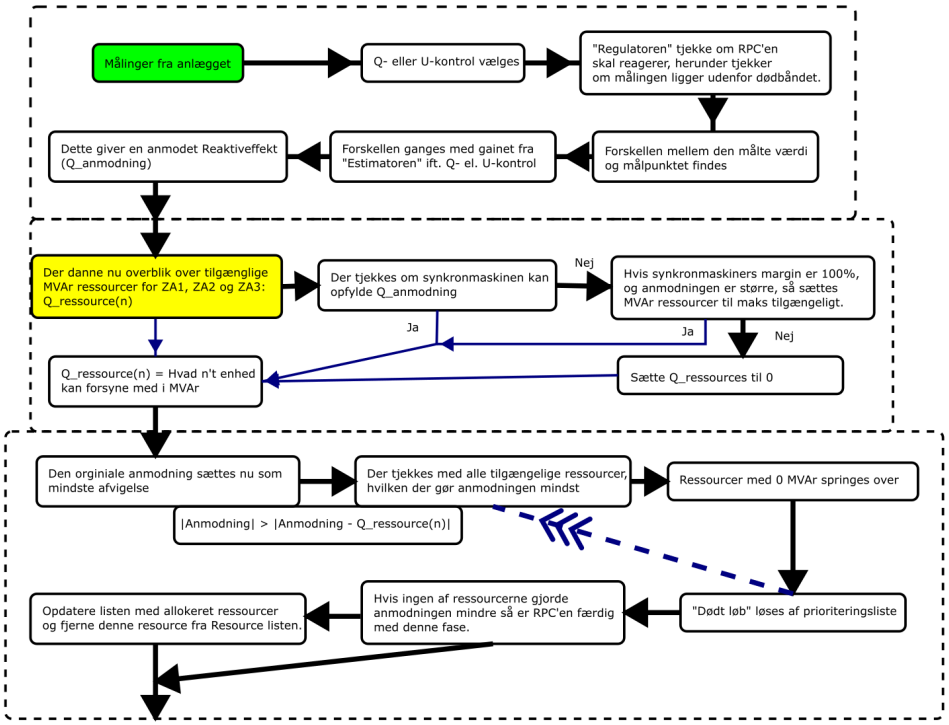


Figure 3.2: Første del af flowdiagrammet for RPC'en

- Gentage processen fra den gule boks i første halvdel og opdatere tilgængelige ressourcer.
- Tjekke om Synkronmaskinen kan bruges lige pt. (Må ikke bruges hvis en er ved at skifte den output).
- Hvis Synkronmaskinen kan bruges og den ved sidste iteration ikke måtte bruge alt kapacitet, lad den nu gøre dette.
- Ellers gå til næste trin

Efter dette så kan RPC'en gå videre til næste og sidste trin, hvor den tjekker om synkronmaskinens referencepunkt skal ændres. Hvis den skal, så skal den nu opdatere de allokerede ressourcer, referencepunkt og den projekterede ændring på systemet og vurdere om denne værdi er udenfor dødbåndet. Hvis den er udenfor dødbåndet så skal den advare operatøren om dette og sende instruktion til komponenterne i anlægget. Den starter da herfra forfra og venter på at "Regulatoren" aktiverer de "afhængige processer" igen.

Derudover er der to uafhængige procsser, som hele tiden skal køre for at sikre at der er tilpas harmonisk filtrering og at RPC'en, og i forlængelse om anlægget, fungerer som det skal. Hvis ikke så skal operatøren advares om dette. Flowdiagrammet for harmonisk filtrering kan ses i figur 3.4.

Processen for harmonisk filtrering er svær at beskrive mere præcist. Grunden til dette skyldes, at hvornår ved RPC'en at den kan *frakoble* filterne. At finde ud af, hvornår

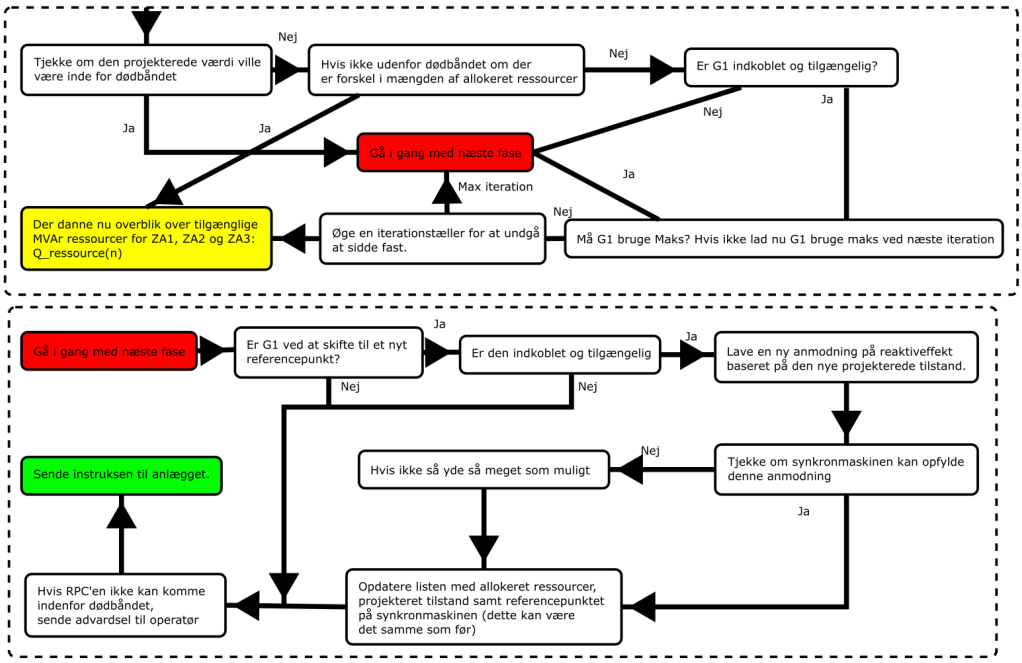


Figure 3.3: Anden del af flowdiagrammet for RPC'en

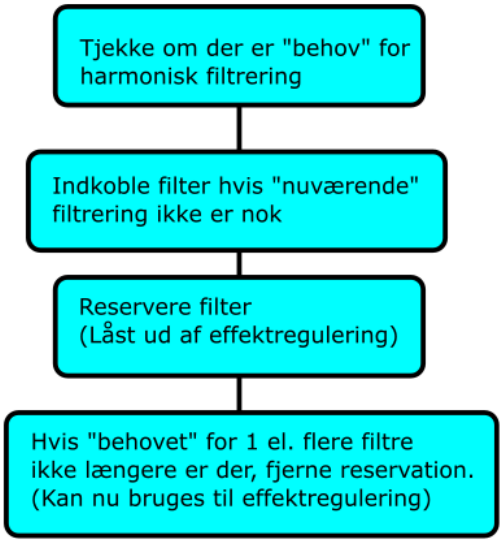


Figure 3.4: Flowchartet for den uafhængige process der tjekker om anlægget opfylder krav om harmonisk filtrering

filterne skal kobles ind er relativt simpelt, da dette er "bare" når den 11. og 13. harmoniske er større end hvad er tilladt (23. og 25. kunne evt. inkluderes men irrelevant for problemet her). Men der ville være et tidspunkt hvor at SK12 er slukket og der ikke er harmonisk støj fra andre kilder. Problemet er at når at filteret kobles ind, så burde de harmoniske være lavere end tilladt, så en "simpel" model ville kræve yderligere undersøgelser. Af den grund, er dette "blackbokset" i dette projekt, og der antages af praktiske grunde i de senere test, at et af filterne skal fjerne harmonisk støj.

Som den anden gruppe af uafhængige processer, er der de processer som holder øje med at RPC'en og at anlægget ikke "laver fejl". Processerne er i et diagram i figur 3.5.

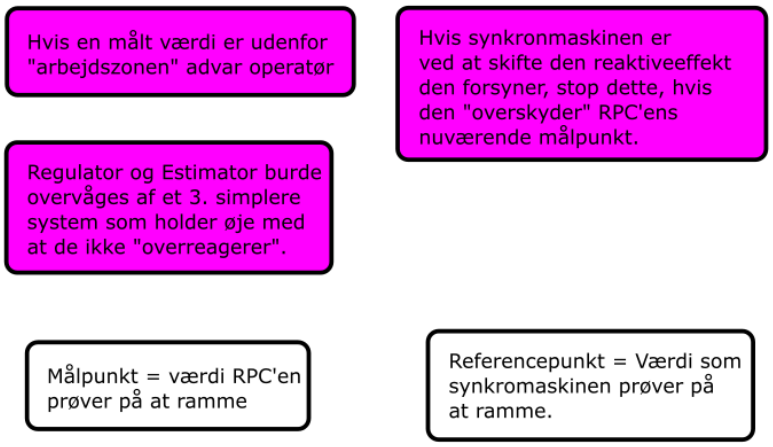


Figure 3.5: Flowchartet for de uafhængige processer der holder øje med RPC'en og anlægget. De hvide kasser er til forklaring af "Målpunk" og "Referencepunkt"

Disse processer er ikke blevet implemteret i MATLAB scriptet, da disse ting ikke pt. er relevant for RPC'ens generelle virkemåde. Disse processer ville dog være stærkt anbefalet som "tilføjelser" til RPC'en, hvis den skulle blive implementeret i virkeligheden. Derudover så skal det noteres, at når der står "Målpunkt" menes der den værdi som RPC'en prøver at opnå ved at koble med filterne og skifte "Referencepunktet" på synkronmaskinen. Referencepunktet på synkronmaskinen er det punkt som synkronmaskinens styresystem prøver at opnå.

Der er 2 meget vigtige ting for RPC'en. Først og fremmest om noget er "tilgængeligt". Dette er en værdi som RPC'en **kun** må læse. Denne fortæller "hele" RPC'en om den overhovedet må bruge denne enhed i dens udregninger og beslutninger. Grunden til dette, er bl.a. hvis der er fejl på en enhed eller den ellers er ude af drift.

Derudover, så er der om en enhed er koblet ind. For filtrene og kondensatorbatteriet er dette **meget** vigtigt ift. den tilgængelige MVAr ressource, som komponenten kan forsyne med. F.eks. så ville et allerede indkoblet kondensatorbatteri (ZA2) kunne yde 80 MVAr spole-effekt, ved at blive koblet ud. For synkronmaskinen så svarer indkoblet og udkoblet til det samme, som om den er tilgængelig eller ej. Pga. måden synkronmaskiner fungerer så kan den ikke *bare* kobles ind når som helst, da bl.a. hastigheden som maskinen roterer med skal matche elnettet det tidspunkt den kobler ind.

Dette er da implementeret i et MATLAB script, som kan efterligne hvordan at RPC'en med "Regulatoren" og "Estimatoren" ville tage beslutninger. Regulatoren vil i dette projekt ses som "tænd signalet" der får RPC'en til at udregne hvor meget reaktiveffekt den skal bruge. Denne ville ideelt vurdere hvor lang tid RPC'en skal "vente" før den "reagerer" igen, baseret på forskellen mellem den målte værdi og dødbåndet.

Estimatoren vil da være repræsenteret ved en værdi som omregner fra det "virkelige" "Q- eller U-domæne" ude i anlægget til en anmodning af MVAr ved en bestemt spænding for f.eks. filtrene. Estimatoren ville hele tiden skulle justeres, da f.eks. mængden af MVAr der skal til for at øge og mindske spændingen ude på samleskinnen ville ændre sig som elnettet ændrer sig.

3.3.2 Beskrivelse af Regulatoren og Estimatoren

Regulatoren og estimatoren er 2 vigtige elementer som ikke er blevet automatiseret til dette projekt, da disse ville kræve en længere analyse af det rigtige anlæg, og hvordan den skal "arbejde sammen" med andre RPC'er ude på elnettet.

Regulatoren burde altid tage forhold til´forskellen mellem den målte værdi, dødbåndet og målpunktet. Normalt burde regulatoren kun skulle gøre noget når at den målte værdi er udenfor dødbåndet og herefter vente indtil at anmodningen til "kondensatorbatterier" og synkronmaskinen er udført. Men der kan vær cases, hvor at det skal gå hurtigere. F.eks. hvis synkronmaskinen er ved at justere til et nyt referencepunkt, men der er nu gået 30 sekunder og forskellen mellem den målte værdi og målpunktet har enten ikke ændret sig eller bliver større. I dette tilfælde er det nødvendigt at ændre den nuværende strategi for at kunne nå målet. Evt. hvis dette ikke allerede er blevet meldt, informere operatøren om denne diskrepans. I dette projekt er Regulatoren repræsenteret ved at anlæggets tilstand opdateres og køres endnu en gang. Se evt. sektion 3.4.3 senere i dette kapitel for en test af denne case, hvor Regulatoren reagerer igen efter en ordre allerede er i effekt.

Estitmatoren ville ideelt hele tiden finde ud af effekten hver MVAr fra f.eks. filtrene har på spændingen i anlægget. I dette projekt er dette blevet repræsenteret ved, at forskellen mellem den målte værdi og målpunktet ganges med en konstant, som f.eks. repræsenterer hvad hver MVAr fra et kondensatorbatteri ville påvirke spændingen med. Estimatoren ville da hele tiden skulle køre og prøve at estimere, hvad den nuværende påvirkning for hver MVAr ville være på f.eks. spændingen på samleskinnen.

3.4 Teste om styringsenheden virker

Med en RPC implementeret i MATLAB, kan RPC'en nu testes i PoweFactory. Forud for testen findes estimatorens værdi til Q- og U-kontrol ved at koble det ene filter ind, som også kommer til at fungere som et "reserveret" harmonisk filter. For ikke at fylde projektrapporten med tests, vil der kun blive skrevet om 5 tests. 2 af dem vil være hvor den målte værdi er under den nedre grænse af dødbåndet, og 2 andre vil være hvor den målte værdi er større end den øvre grænse af dødbåndet. Til sidst laves en test, hvor at synkronmaskinen er ved at ændre sig, men "regulatoren" vurderer "at det går for langsomt" og mere skal ske.

Pga. billedestørrelsen af disse simuleringer, vil resultaterne fra simulering kun blive snakket om her, hvor at resultatet fra PowerFactory kan ses i Appendiks, og der vil være reference til billedet der bliver skrevet om. Under alle test er spændingen fra kilden på 150kV.

3.4.1 Test når den målte værdi er under dødbåndet

For de første tests er den målte værdi under dødbåndet for både effekt- og spændingsstyring på RPC'en. Et billede af systemt før RPC'en reagerer og hvilke informationer den har om anlægget kan ses i sektion XII. Før RPC'en reagerer er følgende i anlægget:

- Samleskinne spændingen er 119,3kV
- Der importeres ca. -114 MVAr
- ZA1 er indkoblet og harmonisk filter
- ZA2 og ZA3 er frakoblet men tilgængelige.
- Synkronmaskinen "er" indkoblet og referencepunktet er 0 MVAr
- For Q-kontrol er målpunktet 10 MVAr og U-kontrol er den 155kV
- Dødbåndet starter ved 0 til 20 MVar og 150kV til 165kV
- Estimatoren er blevet kalibreret

Efter at have fuldt RPC'ens anmodning for Q-kontrol er følgende sket og kan ellers ses i sektion XIII:

- Samleskinne spændingen er nu 139,8kV
- Der importeres 9,9 MVAr
- Synkronmaskinens referencepunkt er nu sat til 114 MVAr kondensator

Hvis RPC'en i stedet for var sat til U-kontrol vil følgende være sket og kan ellers ses i sektion XIV:

- Samleskinne spændingen er nu 157,6kV
- Der importeres nu 157,7 MVAr
- ZA2 og ZA3 er blevet indkoblet.
- Synkronmaskinens referencepunkt er nu 118 MVAr kondensator

Det kan ses at i begge tests løkkedes det RPC'en at ramme indenfor dødbåndet, og for Q-kontrol var der en forskel på 0,1 MVAr og for U-kontrol var der en forskel på 2,6 kV fra målpunktet. For de næste tests vil Q-Estimatoren forblive på nuværende indstilling, hvor at U-Estimatoren vil blive justeret lidt.

Testen ses som succes, og der kigges nu på når værdierne er over dødbåndet.

3.4.2 Test når den målte værdi er over dødbåndet

For at skabe overspændingen i systemet er retningen på SK12 vendt rundt til import, men der overføres stadigvæk 200 MW. Derudover er reaktiveffektregulerende kilder justeret til at skabe overspænding. Læser bør notere at den fjerne last er det samme som før, og at kilden nu modtager aktiveffekt i stedet for at sende. Systemet kan ses i sektion XV, og følgende beskriver systemet.

- Samleskinne spændingen er 175,3kV
- Der "importeres" ca. 232 MVAr
- ZA1 er indkoblet og harmonisk filter
- ZA2 og ZA3 er indkoblet og tilgængelige.
- Synkronmaskinen "er" indkoblet og referencepunktet er 150 MVAr kondensator
- For Q-kontrol er målpunktet stadigvæk 10 MVAr og U-kontrol er den 155kV
- Dødbåndet starter stadigvæk ved 0 til 20 MVar og 150kV til 165kV
- Estimatoren for U-kontrol er blevet kalibreret.

Ved første test prøver RPC'en at nedjustere den reaktive effekt og resultatet for simuleringen kan ses i sektion XVI. Følgende beskriver nu anlægget:

- Samleskinne spændingen er nu 153,7kV
- Der importeres nu 18,7 MVAr
- ZA2 og ZA3 er blevet frakoblet.
- Synkronmaskinens referencepunkt er nu 114 MVAr kondensator

Det ligner at der skete et problem da RPC'en skulle skabe overblik over dens ressourcer og den troede at synkronmaskinen ikke kunne forsyne med mere. Dette er blevet rettet for næste test. Derudover ligner det at Estimatoren for Q-kontrol burde være blevet justeret, dog er RPC'en landet indenfor dødzonen og testen kan ellers ses som en succes.

Nu sættes RPC'en til U-kontrol og resultatet fra simuleringen kan ses i sektion XVII. Følgende ændringer er nu sket:

- Samleskinne spændingen er nu 158,5kV
- Der "importeres" nu 61,6 MVAr
- Synkronmaskinens referencepunkt er nu 18 MVAr kondensator

Nu hvor RPC'en har fuldt overblik over hvad synkronmaskinen kan forsyne med, har den valgt kun at bruge denne til at ændre på reaktiveffekt, hvilket følger den strategi der blev valgt for RPC'en om at lave så få koblinger som muligt. Spændingen er stadigvæk ikke på målpunktet 155kV, men er indenfor dødzonen, hvilket også ses som en succes for testen.

For disse to tests var RPC'en enten 8,7MVar el. 3,8 kV ved siden af, men i begge tilfælde var den indenfor dødzonen. Selvom at RPC'en ikke rammer lige på målpunktet, så ligner det at den fint kan lande indefor dødzonen. Derudover, så kan det også ses, at selvom at estimatoren for Q-kontrol ved den første test anmodede om den reaktive effekt, som resulterede en forskel på 0,1 MVAr, så var den mere end 8MVAr ved siden af ved denne test. Forskellen på spændingen er også større her end ved første test, hvilket indikerer at Estimatoren burde i dens vurderingen tage forhold til bl.a. spændingen i anlægget.

I testen med U-kontrol så blev det anmodet at synkronmaskinen skulle ændres med mere end 100 MVAr, hvilket kan tage noget tid for synkronmaskinen at udføre. I næste test kigges der på hvad der sker når Regulatoren vurderer at mere skal gøres.

3.4.3 Test når synkronmaskinen er ved at skifte output

Til denne test antages det anlægget var i samme stadie som anlægget var i starten af den tidligere test, hvor den målte spænding var større end dødbåndet. Derudover antages det at RPC'en har ændret referencepunktet på synkronmaskinen til det samme som den var i den sidste test. Men i stedet for at nå til referencepunktet, så har Regulatoren vurderet at mere skal ske, og MATLAB scriptet bliver kørt igennem i en antaget "mellempunkts" situation. På tidspunktet beskriver følgende anlægget:

- Samleskinne spændingen er 171,8kV
- ZA1 er indkoblet og harmonisk filter
- ZA2 og ZA3 er indkoblet og tilgængelige.
- Synkronmaskinen forsyner pt. 120 MVAr kondensator.
- RPC'en er sat til U-kontrol med et målpunkt på 155kV
- Dødbåndet er 150kV til 165kV
- Estimatoren for U-kontrol er ikke blive opdateret siden sidst.

I dette tilfælde "opdaterer" RPC'en løsningen og vælger at koble kodensatorbatteriet ZA2 ind, hvilket betyder at der ændres på referencepunktet til synkronmaskinen. Simuleringen af denne nye løsning kan ses i sektion XVIII. Efter implementering af løsning kan følgende værdier aflæses:

- Samleskinne spændingen er nu 156,3kV

- Der importeres nu 41,5 MVAr
- ZA2 er blevet frakoblet.
- Synkronmaskinens referencepunkt er nu 91 MVAr kondensator

Det kan her aflæses at spændingen denne gang nu bliver til 156,3kV, hvilket er tættere på målpunktet end den tidligere løsning. Dette skyldes umiddelbart at den reaktive-effekt kondensatorbatteriet forsyner med afhænger af spændingen i anlægget, hvor synkronmaskinen i PowerFactory altid forsyner præcist med den anmodede reaktive-effekt. Det kan uanset den reelle begrundelse ses at spændingen på skinnen er indenfor dødbåndet og RPC'en har lykkedes med at sænke spændingen på samleskinnen.

3.5 Konklusion af PowerFactory tests

' Fra de 5 forskellige test af RPC'en, kunne det ses at RPC'en ikke landede præcist på målværdien, som RPC'en var indstillet til. Der var dog heller ikke nogen af testene hvor RPC'en decideret fejlede i dens opgave, også selvom at den i den ene test havde et problem med dens overblik af dens "reaktive ressourcer".

I testene kunne det ses, hvilken betydning en korrekt kalibreret Estimator havde for RPC'ens evne til at lande så tæt som muligt på målpunkt den prøvede at ramme. I testene var Estimatoren præsenteret ved et "gain" på forskellen på mellem den målte værdi og målpunktet. Denne Estimator værdi var manuelt justeret baseret på effekten af indkobling af det harmoniske filter og forskellen mellem de målte værdier og målpunktet i simuleringerne.

Regulatoren i testene var repræsenteret ved at vælge "hvornår" at scriptet til RPC'en skulle køres ift. tilstanden i PowerFactory Modellen. I den sidste test var der lavet et eksempel, hvor at Regulatoren vurderede at mere skulle gøres imens synkronmaskinen skiftede til et nyt referencepunkt. RPC'en viste at den kunne opdatere løsningen baseret på omstændighederne og opdatere synkronmaskinens referencepunkt, sådan at den ikke ville over- el. underskyde målpunktet og i forlængelse dødbåndet.

Regulatoren og Estimatoren blev ikke designet i dette projekt, da dette umiddelbart ville kræve mere tid og potentielt kræve adgang til "live" data fra højspændingsstationen for at verificere disse modeller.

I testene blev det vist at flowchartet for RPC'en ville kunne virke i det virkelige anlæg og fungere som RPC, antaget at en Regulator og Estimator også blev designet. RPC'en viste at den kunne følge strategien om færrest koblinger, når at dens ressource-overblik var korrekt.

4. Konklusion på udvikling af Reaktiveffekstyringsenhed

I starten af projektet blev der først forklaret at en RPC er en computer, som modtager målinger fra det område en skal regulere. Derudover skal RPC'en kende informationer om de komponenter den skal regulere, såsom hvor mange MVAr de forsyner ved en bestemt spænding. Ved at bruge disse instruktioner så kan RPC'en tage en beslutning baseret på den strategi som er valgt for den.

I projektet blev strategien valgt til være et fokus på så få ind- og udkoblinger med afbryderne til filterne ZA1 og ZA3 samt kondensatorbatteriet ZA2, og prioritere synkornmaskinen G1. RPC'er vil da ofte kunne indstilles til om de skal regulere spændingen eller den reaktiveeffekt. Dog som noget specielt for 150kV anlægget på transformerstation Tjele, så ville RPC'en skulle sørge for at den harmoniske støj fra højspændingsjævnstrømsforbindelserne Skagerrak 1 og 2 (SK12).

Harmonisk støj kunne beskrives som yderligere signaler, eller Flourier udvidelsen, der bliver tilføjet eller kan adskilles fra grundtonen af 50Hz. Disse signalers frekvens ville da være et heltals multiplicit af 50Hz og ville ofte have en anden amplitude end grundtonen. Måden denne harmoniske støj kunne fjernes på, er ved at bruge et harmonisk filter, som ofte er designet til at fjerne én eller flere frekvenser.

Den harmonisk støj kommer fra SK12, som grundet Flourier transformationen omformere har, der selv efter inklusionen af spoler og kondensatorer, vil kunne måles og ses på output signalet. Pga. manglende data blev denne modeleret på baggrund af nogle antagelser af hvilken type omformer SK12 var, og hvilke harmoniske frekvenser ZA1 og 3 var tunet til.

SK12 er en stort omformeranlæg, som er en Linje kommuteret-omformer (LCC). Denne teknologi bruger et kommunteringssignal til at finde ud af, hvornår at tyristorne skal lukke. Tyristorer vil ikke åbne af sig selv, da strømmen de leder ville sørge for at tyristoren forbliver ledende. Dette løses ved måden at den samlede omformer bliver designet på. Kommunteringssignalet SK12 bruger, er elnettet på stationen. Og pga. måden dette signal bliver brugt på, så bliver tyristorne ledende når spændingen er høj, hvilket betyder at strømmen vil være forsinket og der på vekselstrømsiden vil blive skabt reaktiveffekt. Ofte vil den reaktiveeffekt fra LCC'er være ca. 60% af den aktive effekt der overføres.

Synkronmaskiner er ofte nødvendige til LCC'er, da kommunteringssignalet helst skal være stabilt for at tyristorne åbner og lukker på det rigtige tidspunkt. Synkronmaskiner er elmotorer, hvor deres stator er direkte koblet på elnettet, hvor at selve roterns magnetfelt skabes af enten af en permanent magnet løsning eller spoler, hvor jævn-

strøm sendes igennem. På anlægget i Tjele, findes synkronkompensatoren G1, som i modsætning til almindelige synkronmaskiner der forsyner med aktiv- og reaktiveffekt, så forsyner synkronkompensatorer kun med reaktiveffekt. Derudover bliver rotorens magnetfelt på G1 skabt af spoler med jævnstrøm, og ved at justere strømmen igennem denne kan den reaktive effekt fra G1 justeres. I modsætning til ZA1,2 og 3, så kan G1 ikke bare kobles ind på elnettet og har en mere "krævende process."

Med disse komponenter skulle den påvirkning filtrene ZA1 og 3 havde på harmonisk støj fra SK12 findes. Inden dette blev der lavet 2 analyser af frekvensresponen for filterne, hvor den ene brugte impedanser, og den anden brugte overføringsfunktionen. Begge analyser blev det fundet at filtrene var tunet til 11. og 13. harmoniske. Med dette noteret, blev der lavet en frekvensrespons mellem filterne og en last. Det blev fundet at SK12 ikke ville skabe nok harmonisk støj til at kræve at mere end 1 filter var indkoblet ad gangen, og det blev ellers anbefalet at filterne blev indkoblet når at den harmoniske støj målt i anlægget var over en grænse.

På baggrund af viden om komponenterne og et diagram af anlægget blev der lavet en PowerFactory model af den vestlige side af 150kV anlægget i Tjele. For at skabe spændingsfald i anlægget blev en spændingskilde og last placeret med en luftlinje-model mellem dem. Igennem testene blev det vist at komponenterne reagerede som forventet i forhold til effektreguleringsteknikker der er undervist på AAU. Herunder blev der lavet 2 test, hvor det blev vist at spændingen på skinnen ville kunne reguleres til en præcis spænding, og at der kan være situationer hvor at RPC'en ikke ville kunne opnå målet.

RPC'en blev lavet som et script i MATLAB, hvilket havde den fordel at det simulerede signal input og output til og fra en virkelig RPC. Strategien som blev implemeret ville primært bruge G1 til at yde reaktiveffekt. For at RPC'en ville virke i virkligheden blev der impliceret 2 yderliger "systemer", en Regulator og en Estimator. Regulatoren ville styre hvornår at RPC'en skulle reagere, hvor at Estimatoren skulle udregne den præcise reaktiveeffekt, som skulle anmodes fra anlæggget.

Det hele blev visualiseret ved hjælp af et flowdiagram, hvor at der var 2 grupper af uafhænige processer fra resten af RPC'en. Den ene ville holde øje med hvornår at filterne skulle ind- og udkobles ift. harmonisk støj. Den anden proccess, bestod at 3 mindre processer. Den ene ville holde øje om selve anlægget var udenfor en "arbejd-szone", den anden om G1 var ved at overskyde RPC'ens målpunkt og stoppe den på dens nuværende output, og den tredje ville holde øje med om Regulatoren og Estimatoren gjorde noget som de ikke måtte. De uafhængige processer samt Regulatoren og Estimatoren, blev ikke implementeret vha. kode og blev styret manuelt.

Et MATLAB script blev da lavet, hvor komponenternes nuværende status blev brugt til at vurdere om de kunne bruges til at yde reatkiv effekt, og hvor meget reaktiveffekt de kunne yde. Komponenterne der kunne komme tættest på at opfylde en anmoning for reaktiveffekt ville blive brugt, indtil den projekterede værdi er indenfor dødzonen eller at ikke flere ressourcer var tilgængelige. Dette blev til sidst sendt ud som en anmodning, og noter om denne værdi ville være indenfor eller udenfor dødzonen ville være blive noteret og evt. sendt til operatøren.

RPC'en blev da testet i 5 situtioner på et "ubalanceret" anlæg, hvor længden på luftlinjerne var anderledes. I alle tests kunne RPC'en på én anmodning ramme indenfor dødzonen. Den sidste test viste også at RPC'en kunne opdatere synkronkompensatorens referencepunkt, hvis f.eks. Regulatoren vurderede at det gik for langsomt, og at et kondensatorbatteri skulle kobles ind. Det blev på baggrund af dette vurderet at det var lykkedes med at udvike en RPC, som kunne regulere reaktiveffekt og spændingen på en transformerstation. Det blev dog anbefalet at der blev brugt tid på at udvikle Regulatoren og Estimatoren, hvis at RPC'en skulle implementeres i det virkelige anlæg.

I projektet blev følgende da gennemgået.

- Hvordan en RPC fungerer, og hvilke krav der er
- Lidt om hvordan synkronkompensatorer virker og kan en bestemt reaktiveffekt ved at justere roterens magnetfelt
- Hvordan Linje Kommuteret Omformere og tyristorer virker
- Hvorfor Linje Kommuteret Omformere producerer harmonisk støj og reaktiveffekt
- Harmoniske støj, hvordan det skabes og kan filtreres
- Grænserne for harmonisk støj på 11. og 13. harmonisk er på 3% af grundtonen
- Filterne ZA1 og 3 er tunet til at fjerne 11. og 13. harmoniske
- Skagerrak 1 og 2 er 12-puls omformere
- Det blev fundet frem til at Skagerrak 1 og 2 forhold for W pr. VAr er 0,6
- Kun ét af filterne er krævet for at fjerne harmonisk fra SK12 ved maksimal last.
- En model af den vestlige sektion af 150kV vekselstrømgården i Tjele blev lavet i PowerFactory
- En fjern kilde og last blev indsat for at simulere spændingsfald på samleskinnen
- Modellen blev testet med alle komponenter og fundet til at kunne teste en RPC
- En RPC blev designet til at lave så få ind- og udkoblinger som muligt.
- RPC'en blev implementeret som MATLAB script med undtagelse af en Regulator og Estimator
- Regulator og Estimator blev justeret manuelt
- Der blev udført 5 forskellige test på 3 forskellige situationer
- RPC'en fik info fra PowerFactory, og RPC'ens anmodning blev udført i PowerFactory
- RPC'en kunne lande indenfor det givne dødbånd ved alle testene

- RPC'en blev ses som succefuld i det givne testmiljø
- Yderligere udvikling var anbefalet hvis RPC'en skulle implementeres i virkeligheden

I projektet blev der indsamlet information om harmonisk støj og filtering, samt hvordan at LCC'er og synkronmskiner virker og påvirker elnettet. Skagerrak 1 og 2 laver ialt ca. 290 MVAr når de omformer 500MW. Det blev undersøgt og fundet frem til at den harmoniske støj fra Skagerrak 1 og 2 ville kunne filtreres ved kun at koble ét filter på samleskinnen. En RPC blev designet og herefter implemeteret i MATLAB, hvilket lod RPC'en simulere hvordan en rigtig RPC er afhængig at den får de rigtige informationer fra anlægget. En model af den vestlige del af vekselstrømsanlægget på transformerstation Tjele blev implementeret og testet i PowerFactory, hvorfra modellen blev brugt til at teste og validere RPC'en. Det vurderet fra testene at strategien med færrest koblinger og virkemåden for RPC'en kunne virke i et virkeligt anlæg, antaget at en Regulator og Estimator også blev designet.

I projektet blev der skabt og udviklet en RPC, som kunne sørge for harmonisk filtrering, prioritering af ressourcer samt styre spændingen eller reaktiveffekt på 150kV samleskinnerne en simuleret udgave af 150kV anlægget på transformerstation Tjele. I figur 4.1 er et billede af det anlæg som blev simuleret.

Figure 4.1: 150kV AC-gården på Transformerstation Tjele

Bibliography

[1] Inc. The MathWorks. *Help Center*. https://se.mathworks.com/help/index.html?s_tid=CRUX_lftnav. Link besøgt d. 15-01-2026. Co-Pilot er primæt blevet brugt til at "lave opslag" i dokumentationen for MATLAB, og "auto complete" har sjældent været brugt til ting som f.eks. når en graf skulle laves.

[2] OpenAI. *Hvad kan jeg hjælpe med?* https://chatgpt.com. Link besøgt d. 15-01-2026. ChatGPT er brugt uden en konto. Samtalerne er ikke blevet gemt.

[3] Energinet. *Strategi*. https://energinet.dk/om-os/strategi-og-resultater/strategi/. Besøgt 12-01-2026.

[4] Jesper Nørskov Rasmussen Christian Frank Flytkjær. *Energinet fjerner stor byrde fra VE-udviklere og store, elforbrugende virksomheder*. https://energinet.dk/om-nyheder/nyheder/2025/energinet-fjerner-stor-byrde-fra-ve-udviklere-og-store-elforbrugende-virksomheder, 2025. Besøgt: 13-11-2025.

[5] Stephen D. Umans. *Electric Machinery; Seventh Edition; SI Edition*. Mc Graw Hill, 2014.

[6] Muhammad H. Rashid. *Power Electronics; Devices, Circuits, and Applications; Fourth Edition*. Pearson, 2014.

[7] R. Mark Nelms J. David Irwin. *Engineering Circuit Analysis, 11th Edition*. Wiley, 2015.

[8] International Electrotechnical Commission. *Electromagnetic compatibility (EMC)*. International Electrotechnical Commission, 2008. Del 3-6. Også kendt under navnet: IEC TR ; 61000-3-6.

[9] ABB Drives. *Technical guide No. 6 — Guide to harmonics with AC drives*. https://library.e.abb.com/public/bc35ffb4386c4c039e3a8ec20cef89c5/Technical_guide_No_6_3AFE64292714_RevF_EN.pdf, 2017. Hentet den: 14-11-2025.

[10] Elnet.dk Dansk Energi. *Oversigtsskema til nye Tekniske betingelser for nettilslutning af produktionsanlæg til mellem og højspændingsnettet større end 1kV*. https://elnet.dk/materialesamling/oversigtsskema-til-nye-tekniske-betingelser-nettilslutning-produktionsanlaeg-til-0, 2021. Hentet d. 20-11-2025.

[11] ASEA. *Skagerrak HVDC överföring Annläggningsbeskrivning Prestanda*, 1977. Revideret 1992. Dokumentet er på svensk og IKKE offentligt tilgængelig.

[12] J. Duncan GloverThomas J. OverbyeMulukutla S. SarmaAdam B. Birchfield. *Power System Analysis & Design; Seventh Edition; SI Edition*. Cengage, 2023.

[13] DIgSILENT GmbH – Power System Solutions. *PowerFactory – LV Distribution Network – Base Model*. https://www.youtube.com/watch?v=P6c6l65sCrg. Link besøgt d. 15-01-2026. PowerFactory modellen og "oplæring" herfra er sket vha. videoer, tilfældige forum opslag på virksomhedens hjemmeside og hjælp fra Claus Leth Bak.

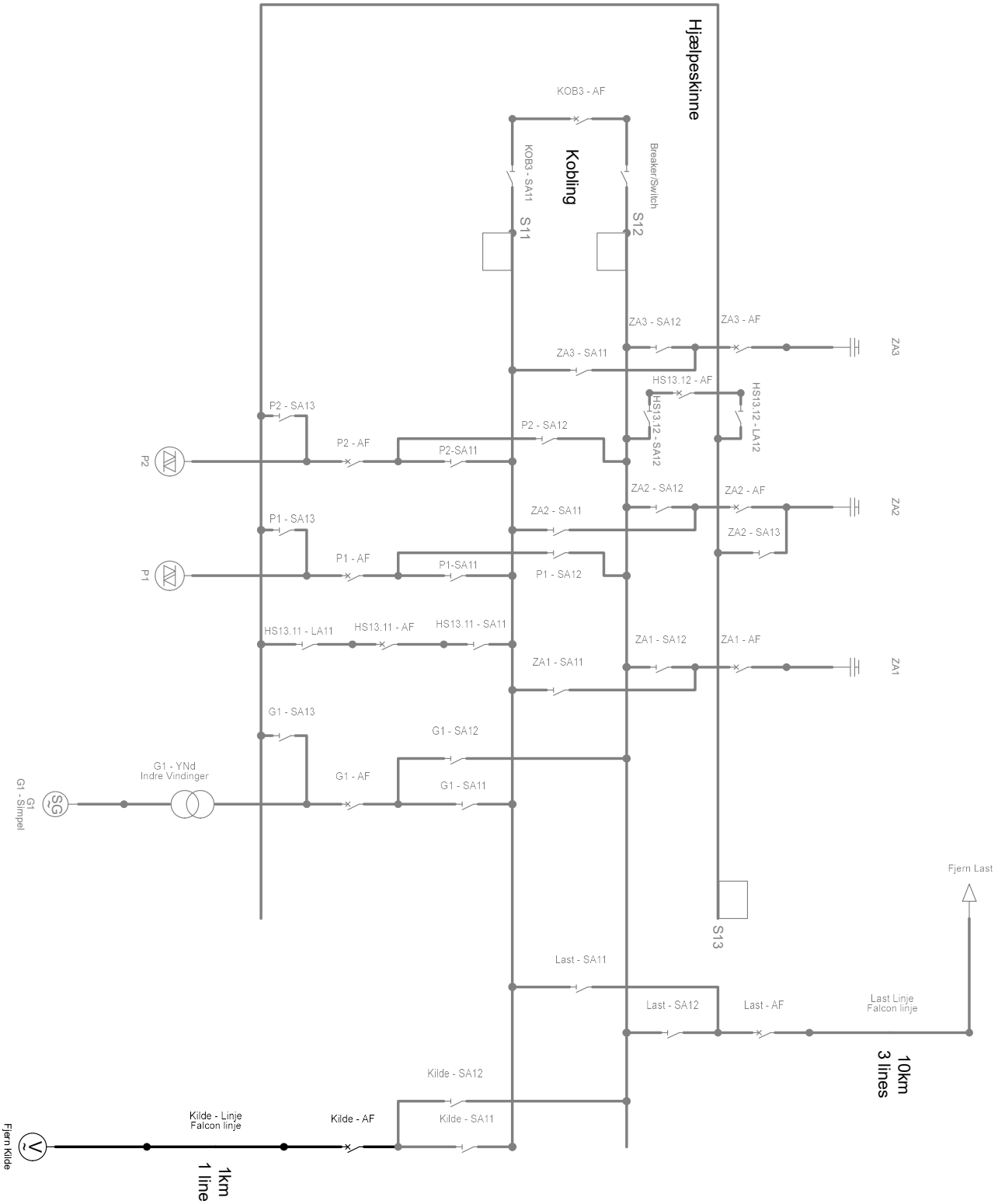
[14] Google. *Google maps - måldistanceværktøjet*. www.google.com/maps/@56.9480666,9.8977536,5654m/data=!3m1!1e3?authuser=0&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI2MDEwNy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D. Besøgt 14-01-2026.

Appendiks

For at have Appendiks titlen og pga. måden billederne fra PowerFactory bliver præsenteret, skal denne side eksistere. I mellemtiden her et et billede fra taget af SK4.

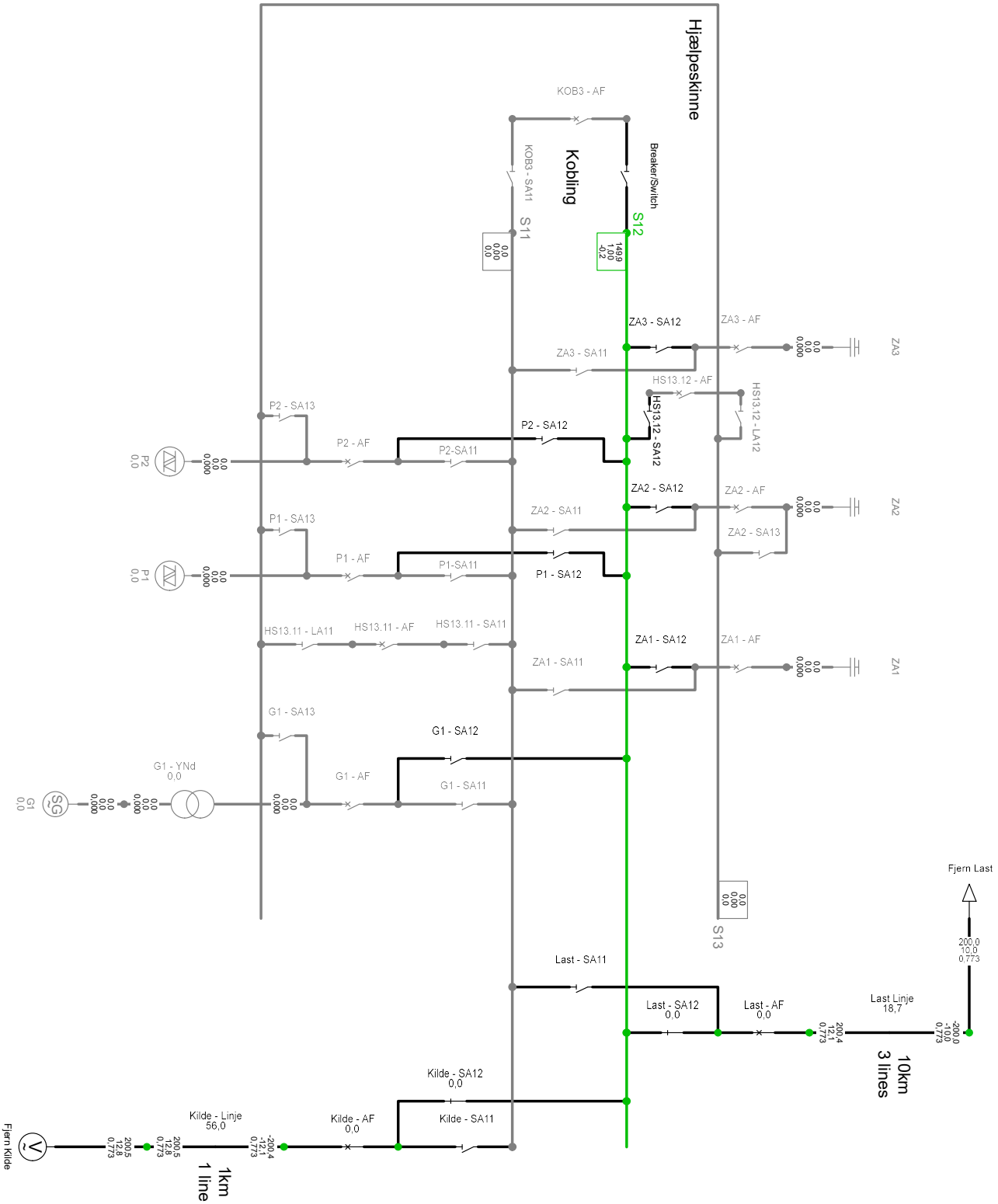
Billedet er fotograferet fra taget af Skagerrak 4 på transformerstation Tjele. I billedet kan hovedbygningen/kontoret ses i midten. Til venstre, den hvide bygning, som er Skagerrak 1 og 2. I midten den blå synkronmaskine G1, omringet af blå mure. Lidt til højre kan KT52 og KT51 ses, som skifter spændingen fra 150kV til 400 kV, imellem de store vide mure. Helt i baggrunden først den østlige side af 150kV gården, og lidt mere til venstre kan Apples Datacenter og transformerstationen ude foran ses.

I PowerFactory diagram den vestlige del af 150kV vekselstrømsgården på transformerstation Tjele



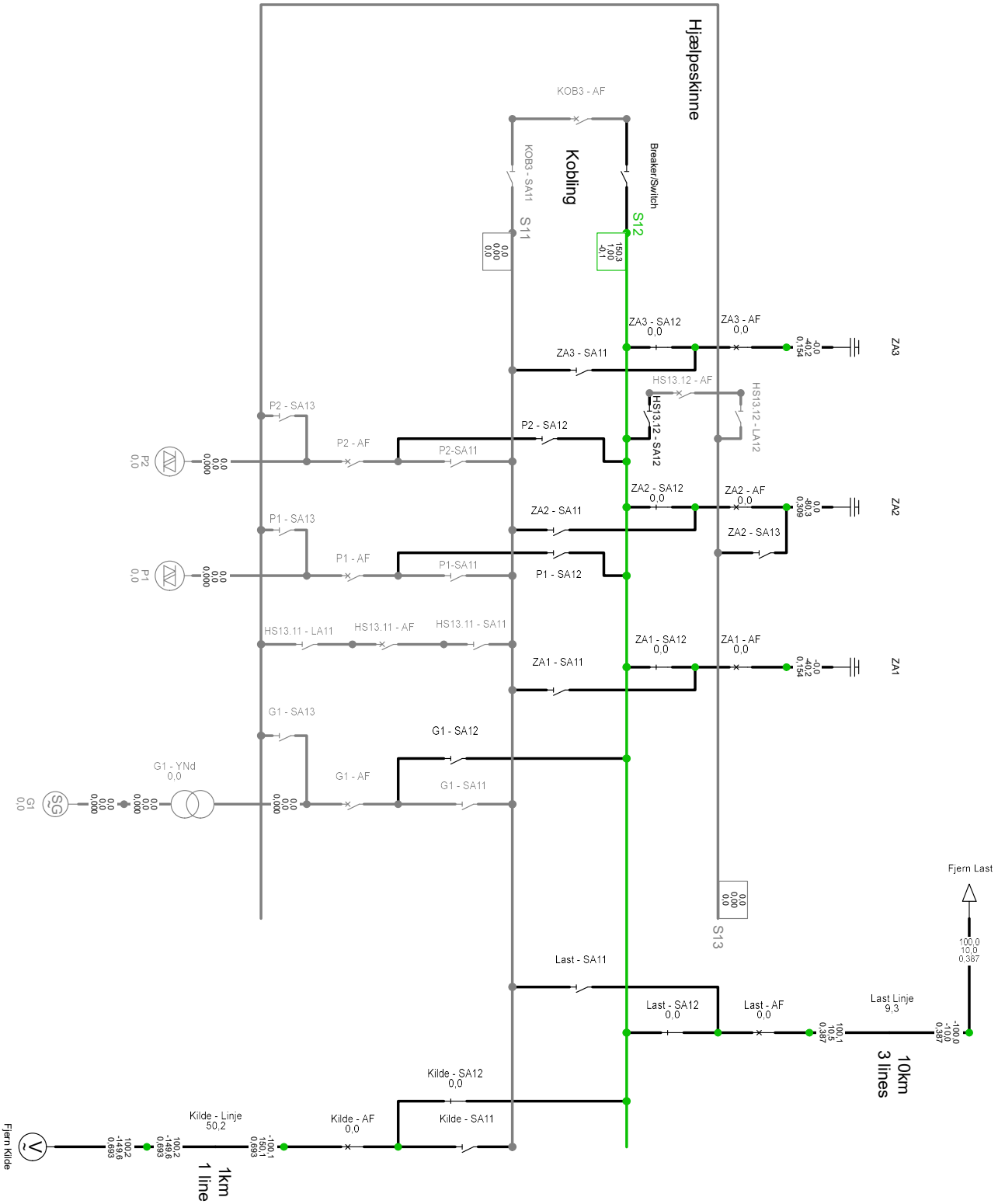
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

II PowerFactory simulering med kun last og kilde indkoblet



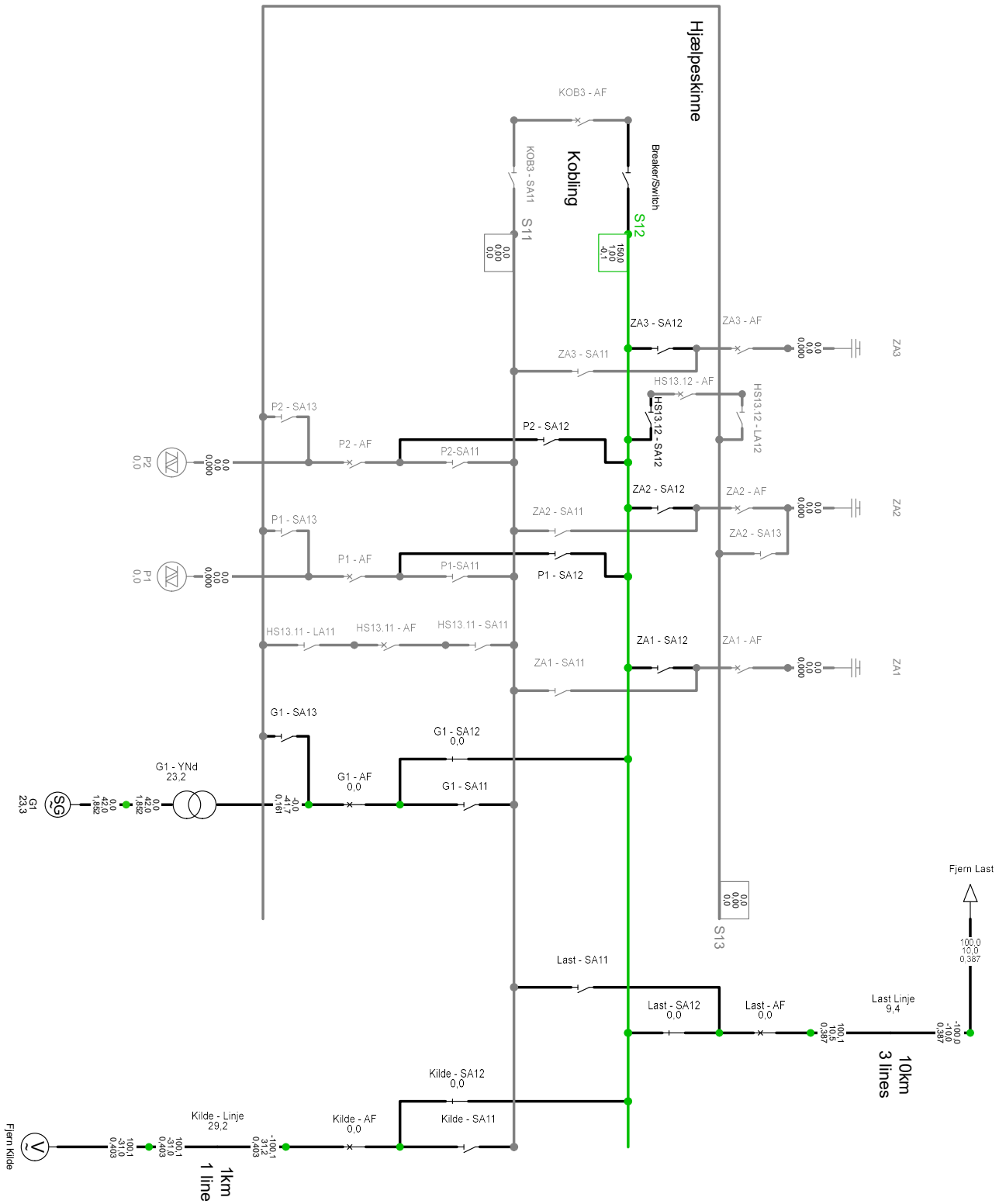
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

III PowerFactory simulering med alle filtre indkoblet



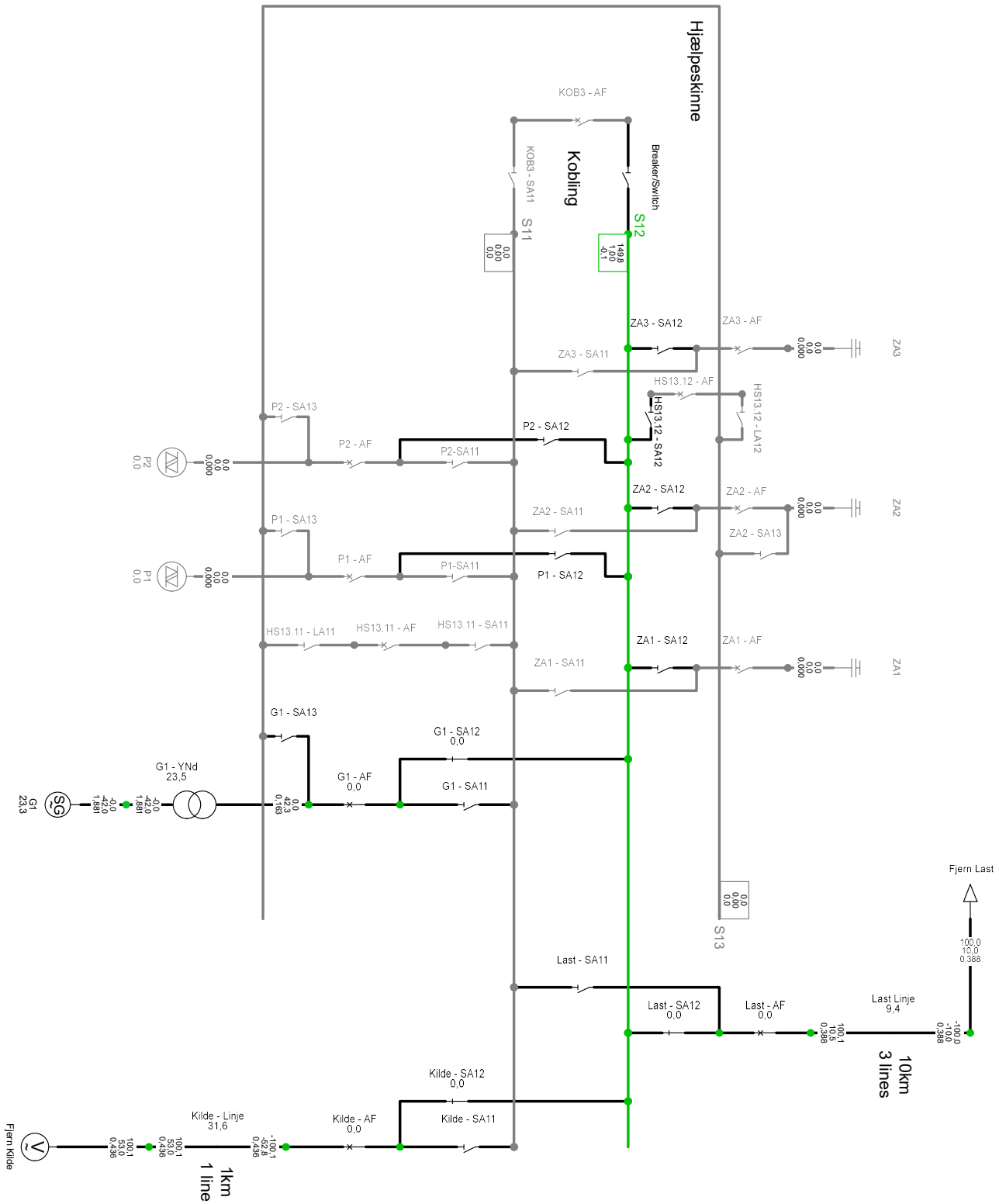
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

IV PowerFactory simulering med synkronmaskinen indkoblet og hvor den forsyner med positivt reaktiveffekt



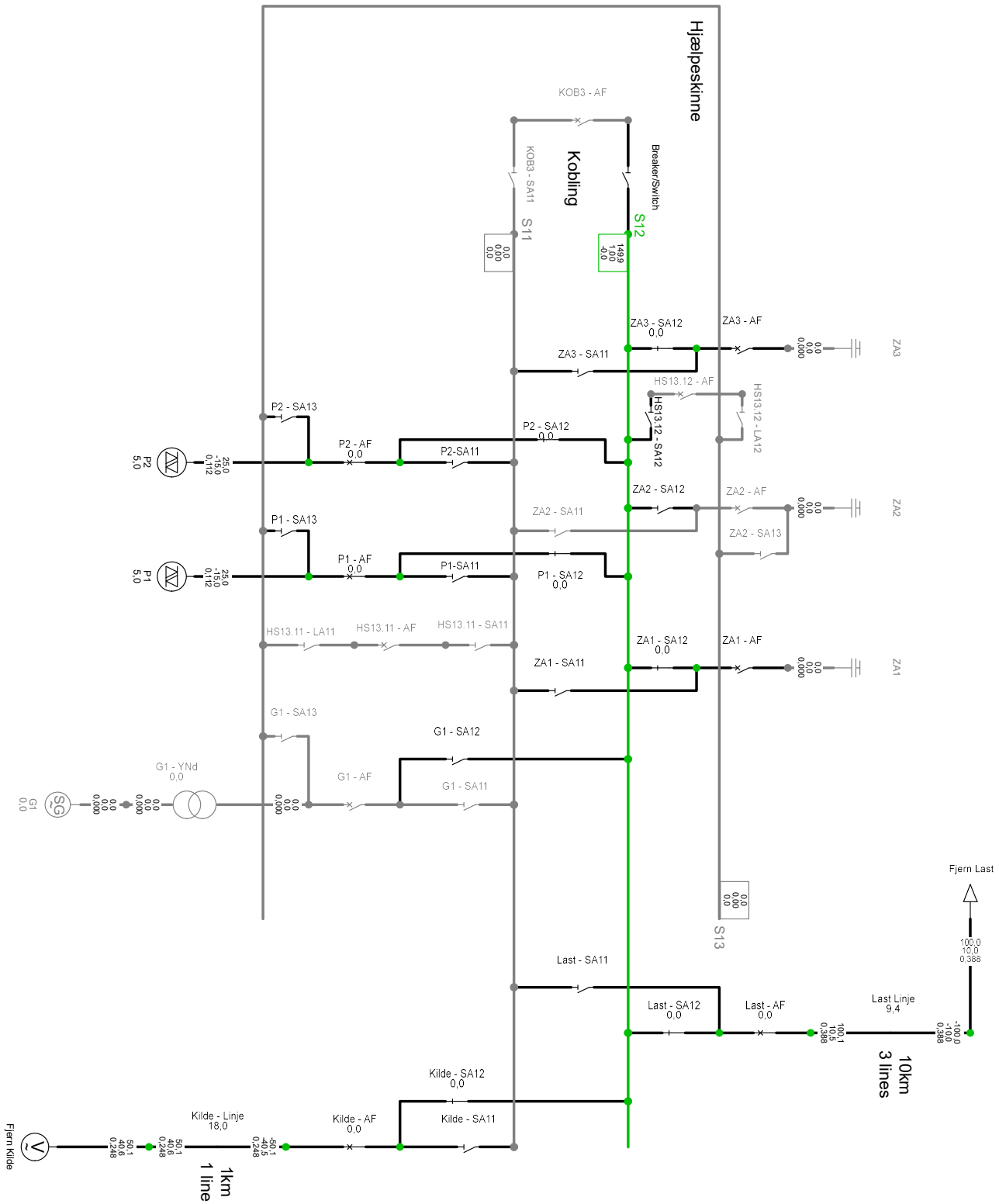
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

V PowerFactory simulering med synkronmaskinen indkoblet og hvor den forsyner med negativ reaktiveffekt



Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

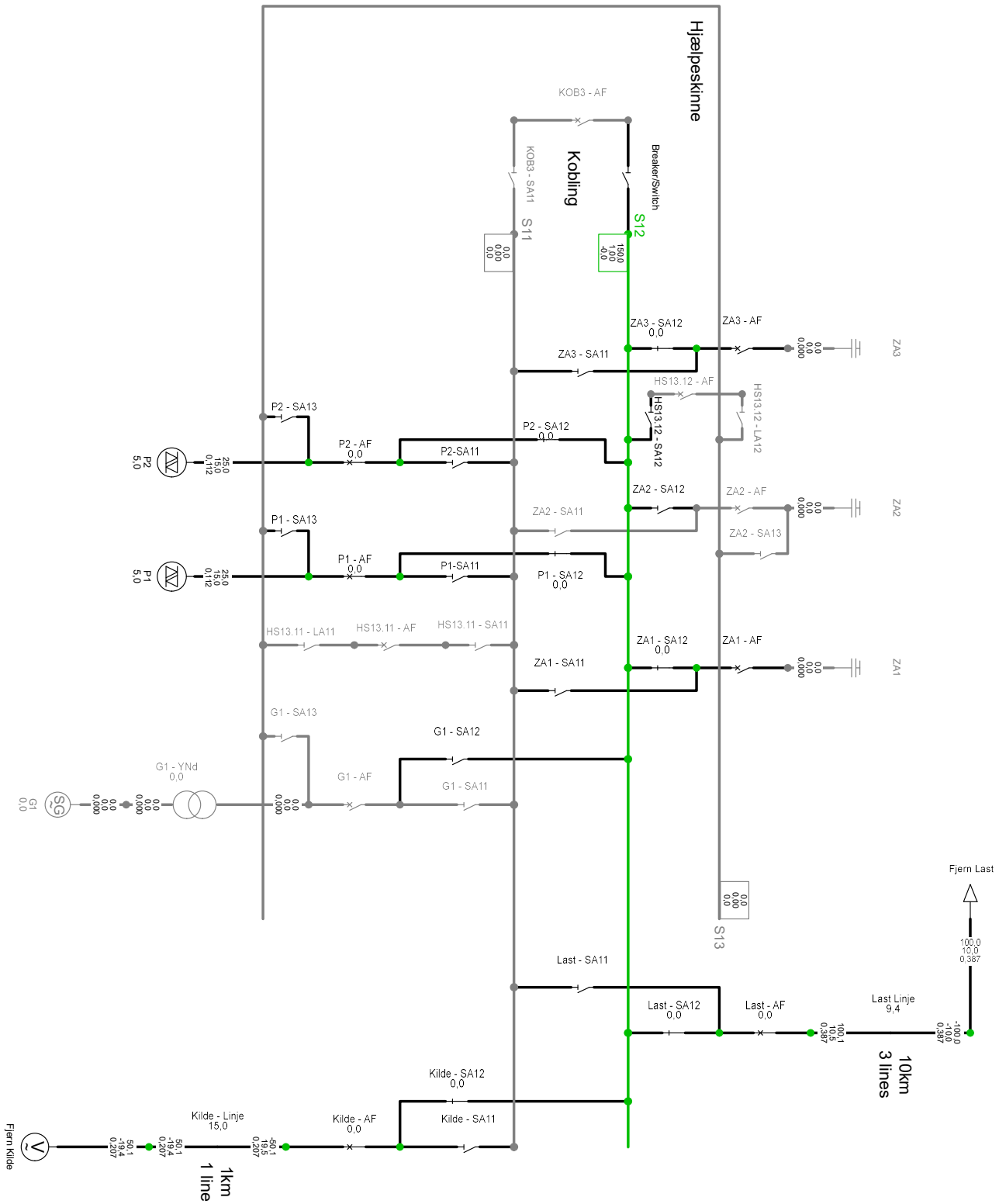
VI PowerFactory simulering hvor SK12 importerer og yder negativ reaktiveffekt



Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

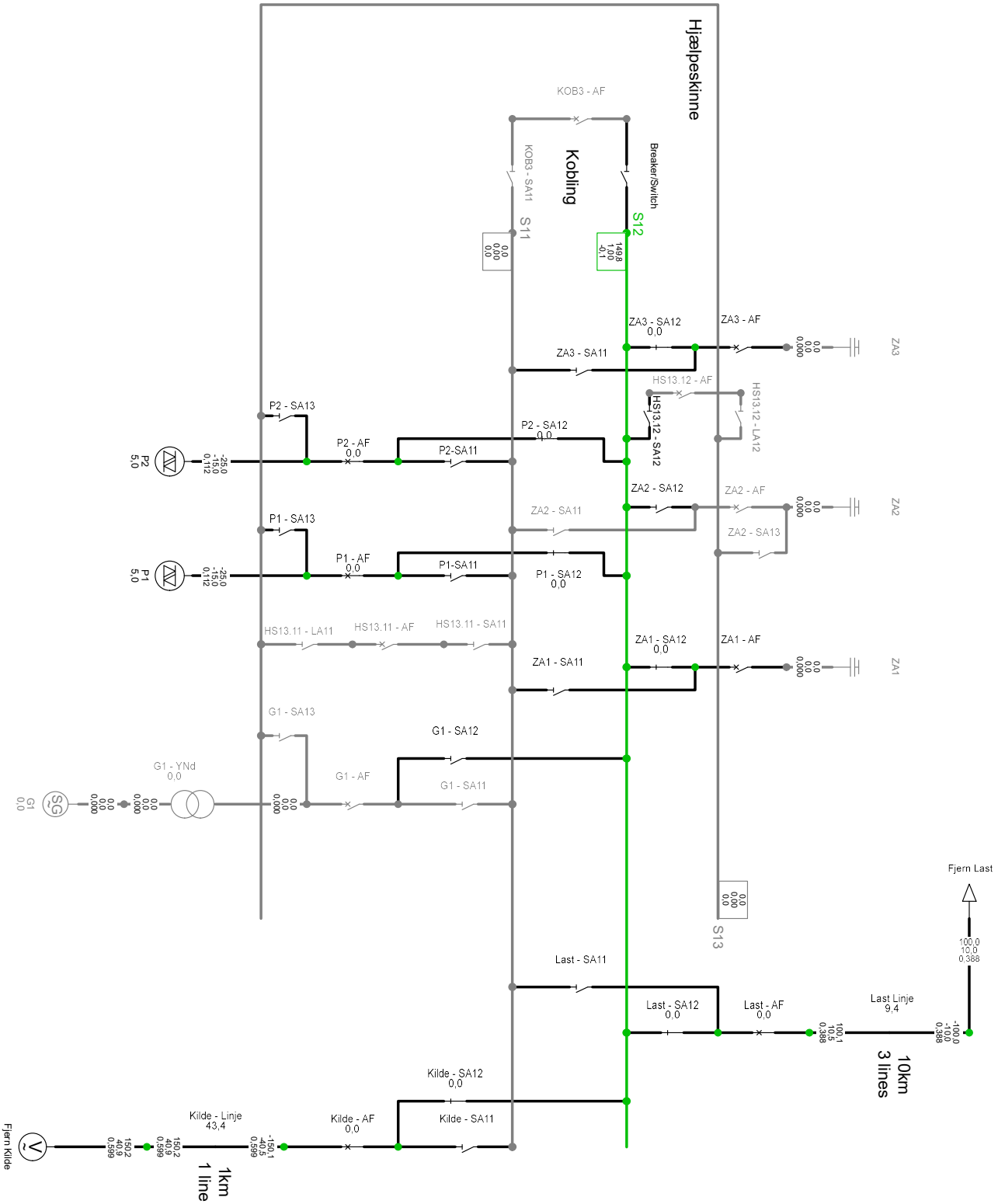
VII PowerFactory simulering hvor SK12 importerer og yder positiv reaktiveffekt

1070



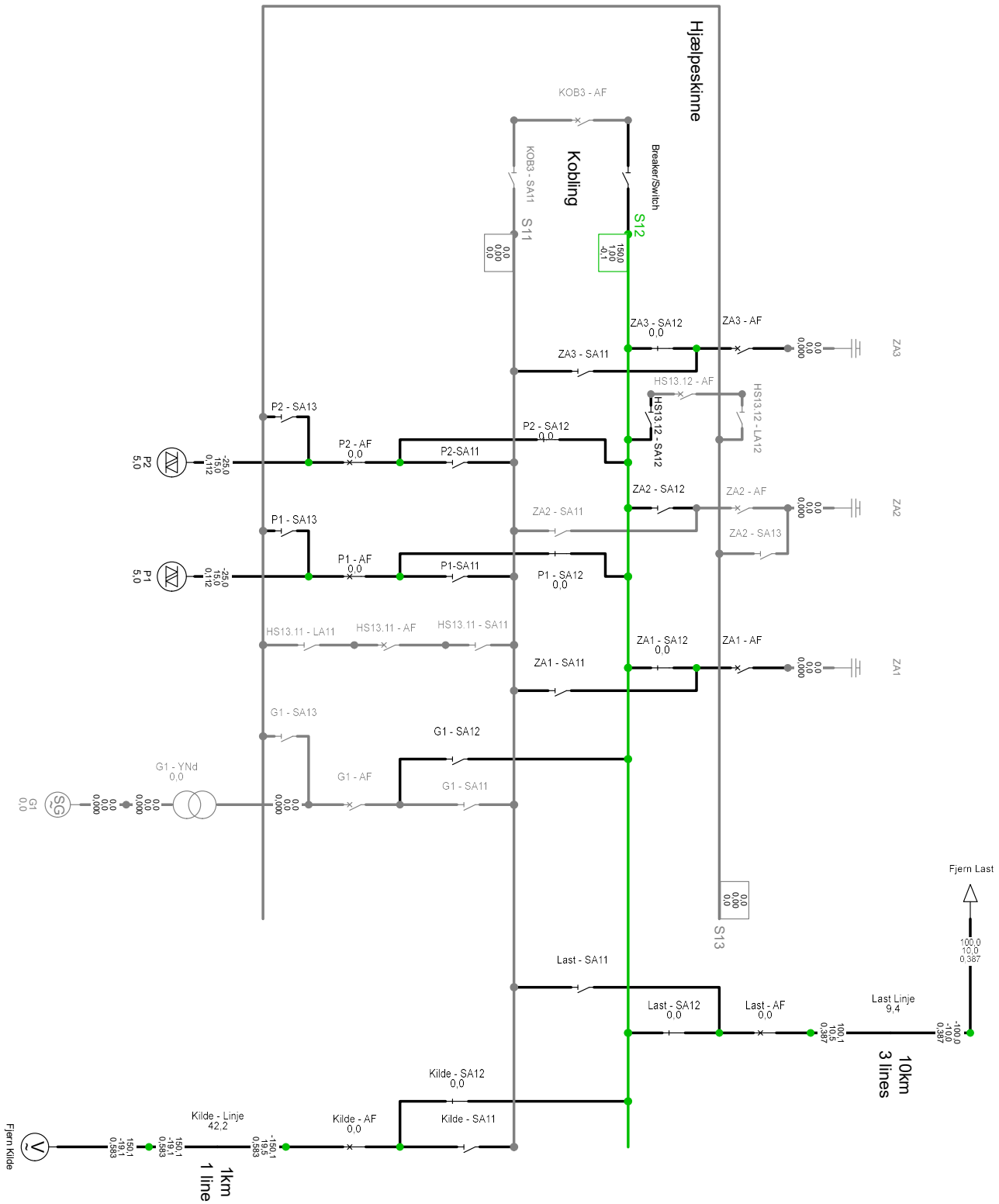
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

VIII PowerFactory simulering hvor SK12 eksporterer og yder negativ reaktiveffekt



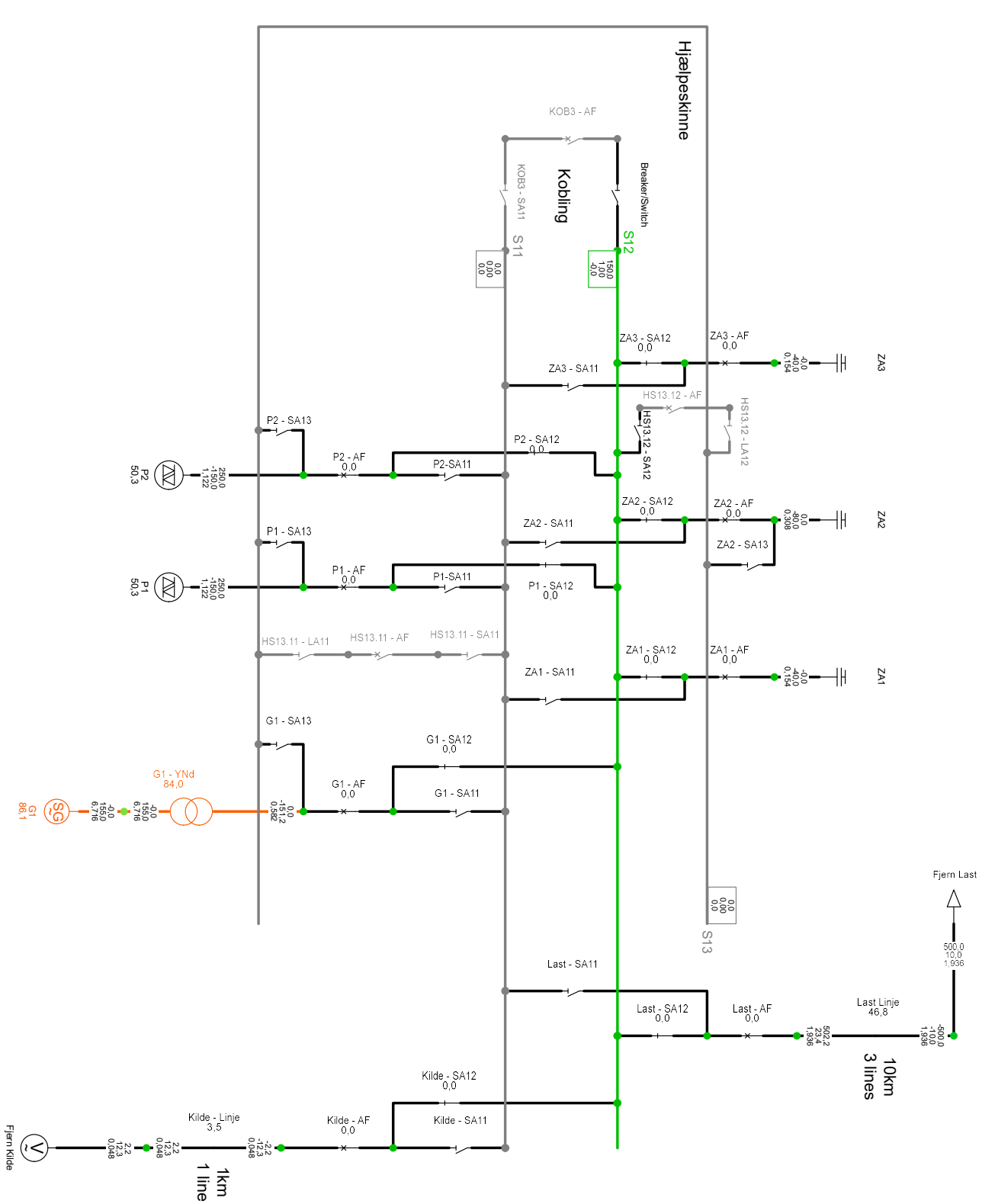
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

IX PowerFactory simulering hvor SK12 eksporterer og yder positiv reaktiveffekt



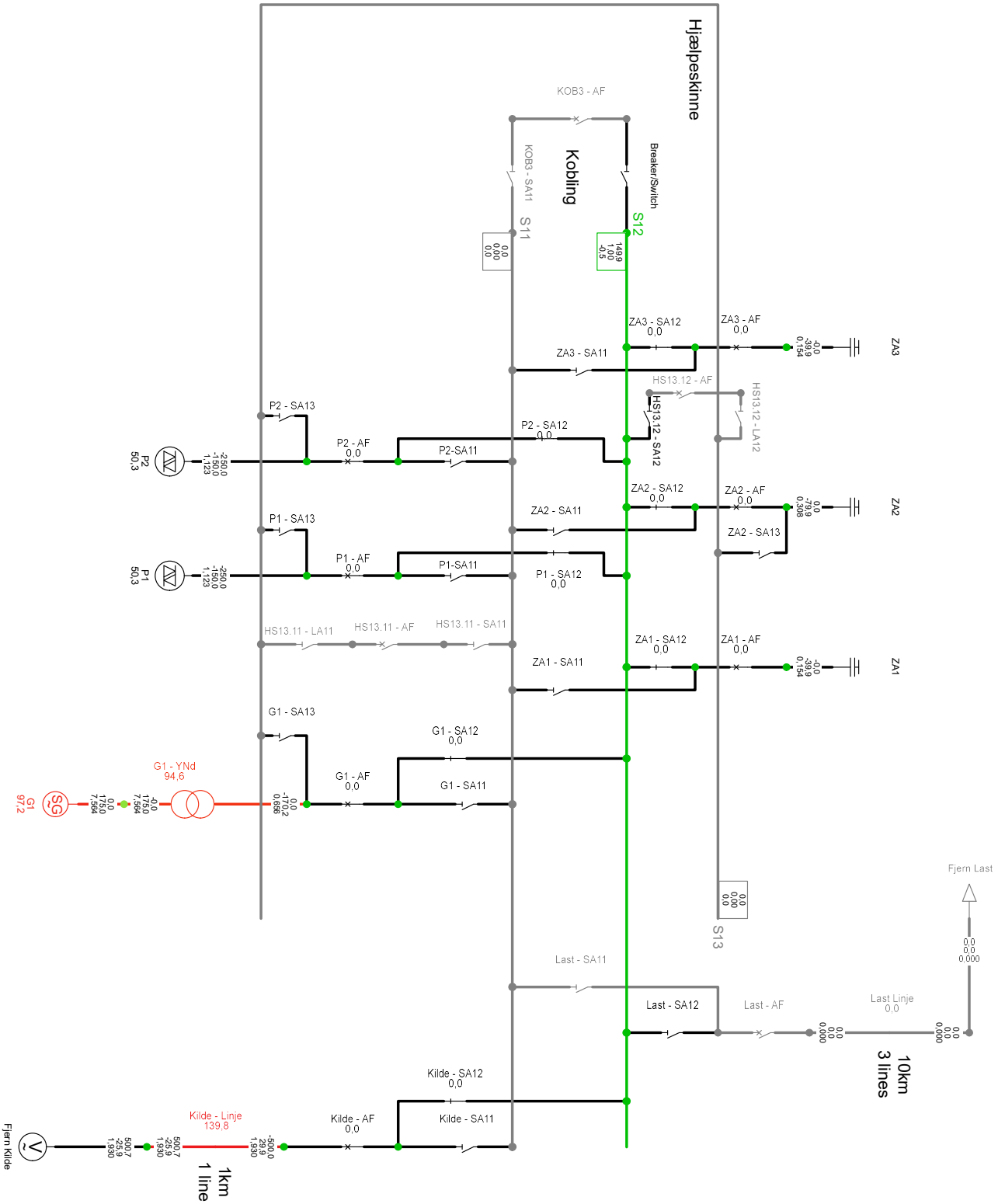
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

X PowerFactory simulering hvor SK12 importerer ved maks last og anlægget er blevet manuelt reguleret så tæt på 150kV



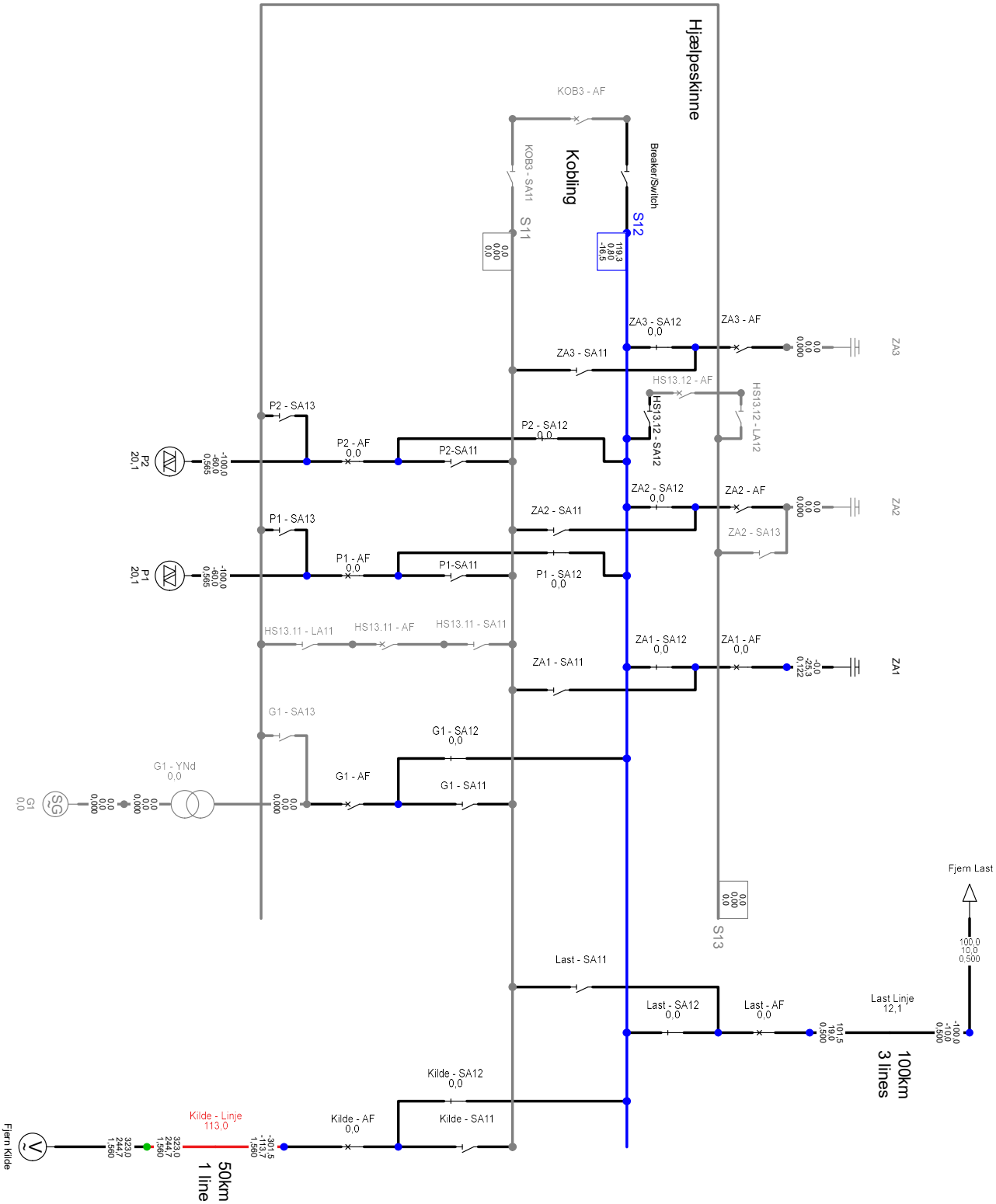
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

XI PowerFactory simulering hvor SK12 eksporterer ved maks last og anlægget er blevet manuelt reguleret så tæt på 150kV



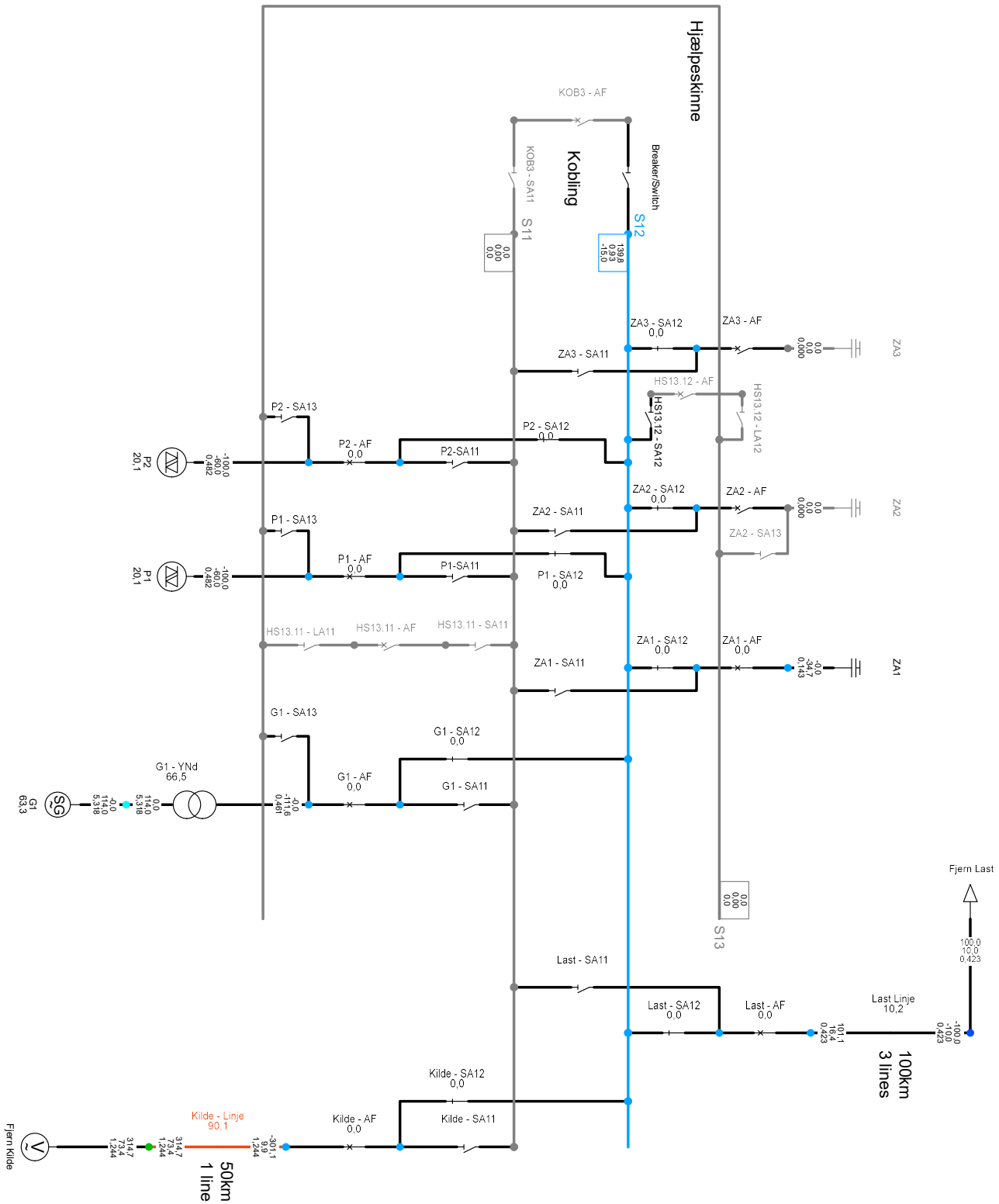
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

XII PowerFactory simulering hvor hvor der er underspænding og effekfaktoren er lagging



Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

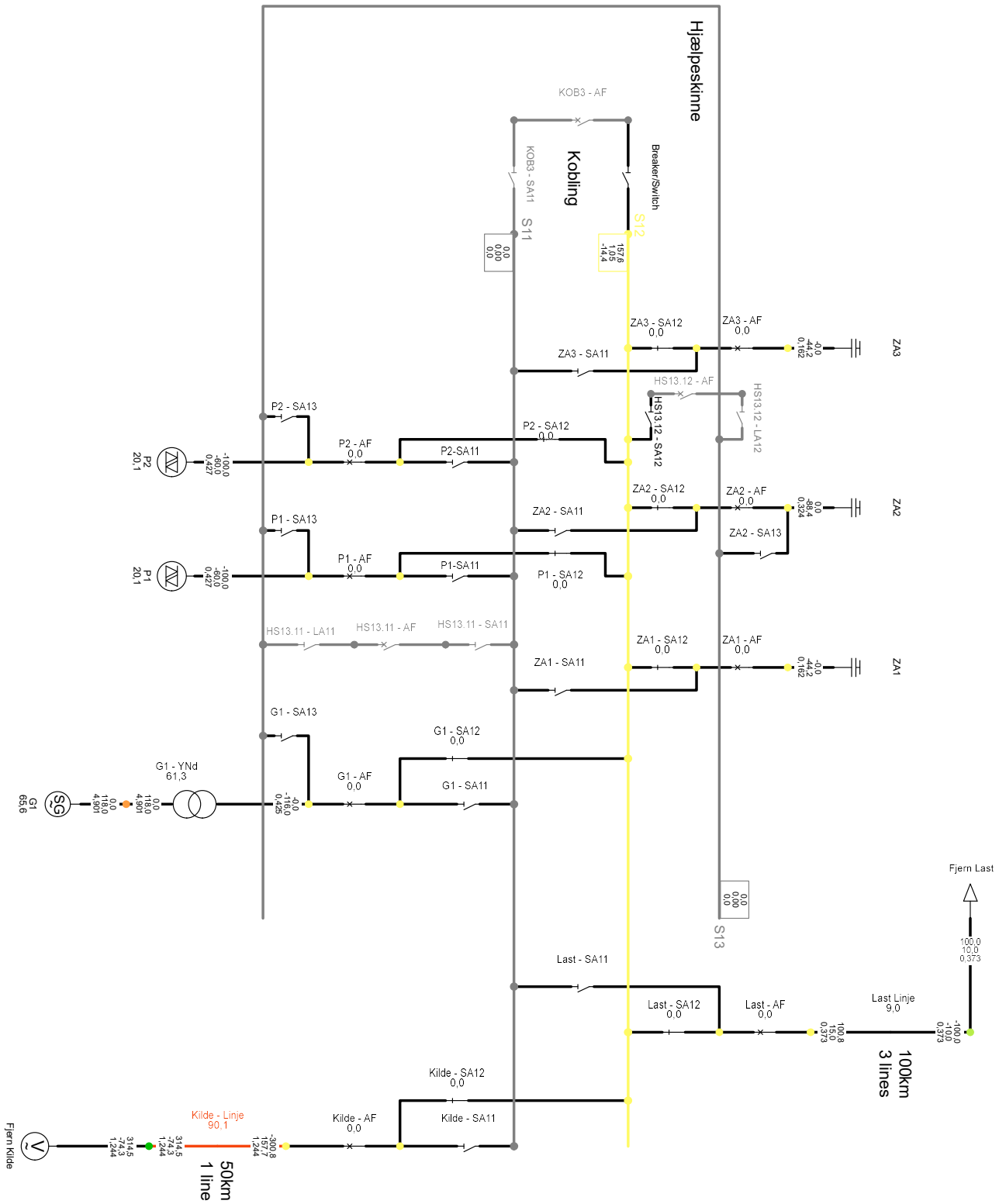
XIII PowerFactory simulering hvor der var under underspænding og effektfaktoren var lagging. Effektkontrol



Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

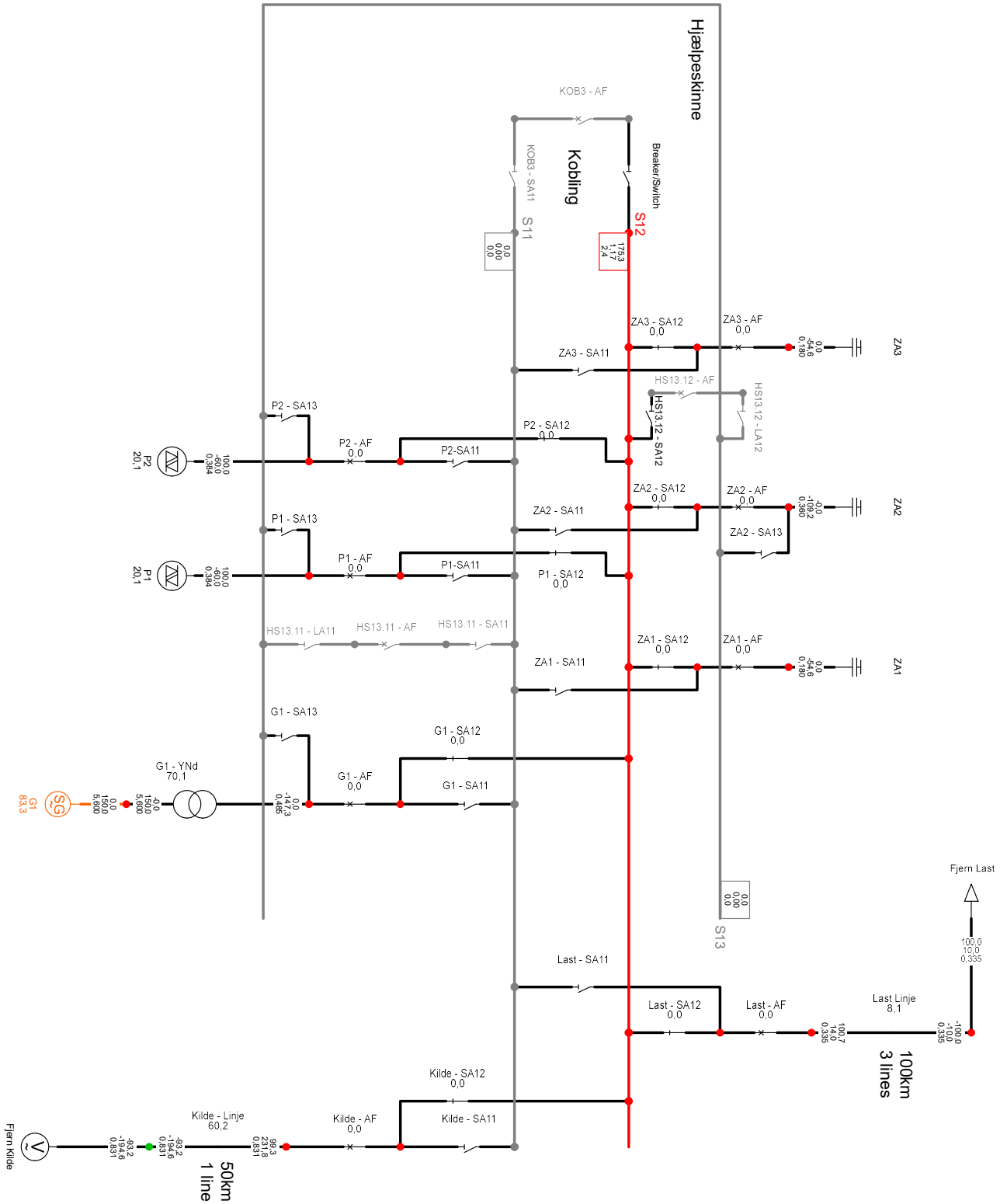
XIV PowerFactory simulering hvor der var under underspænding og effektfaktoren var lagging. Spændingskontrol

1095



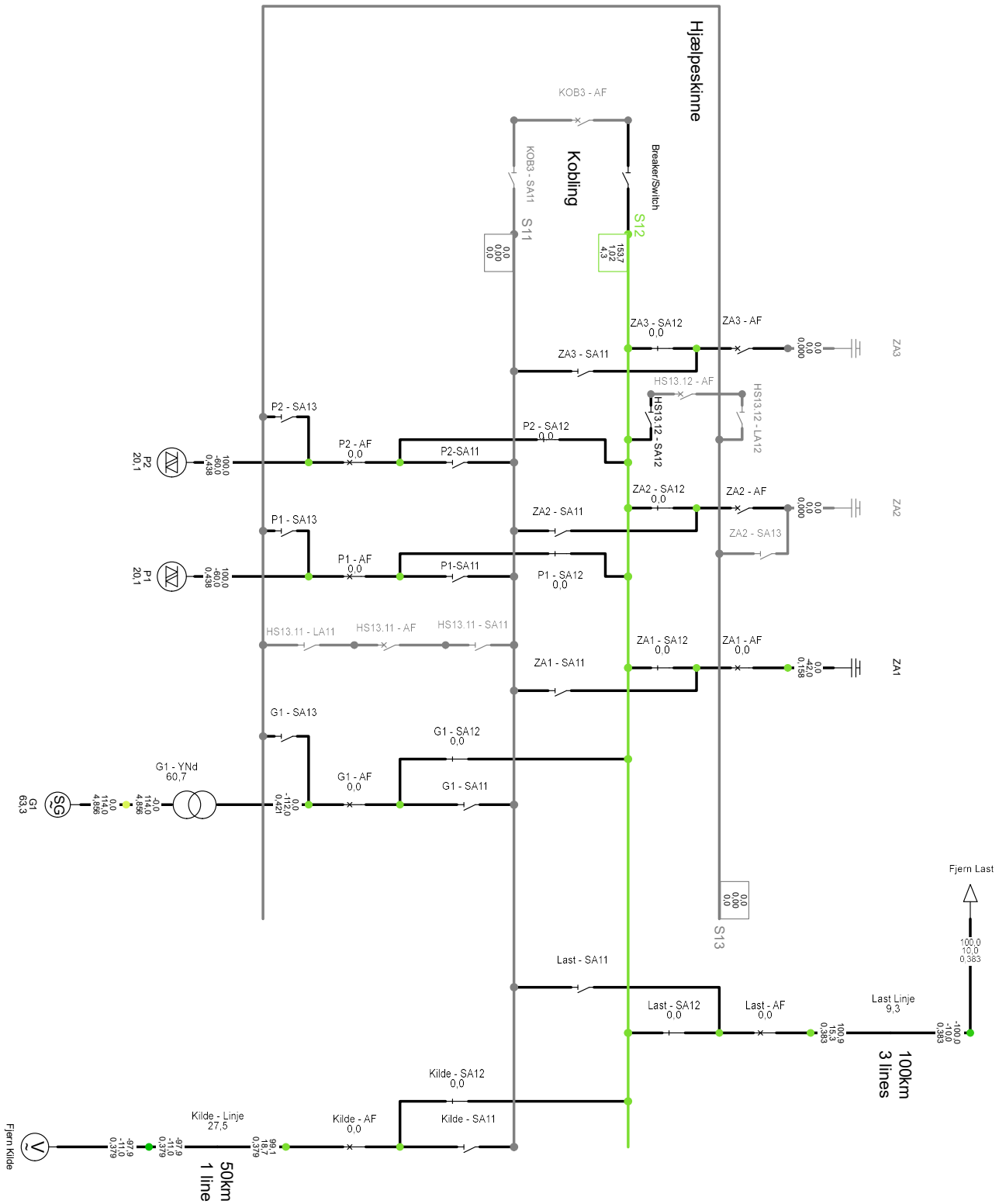
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

XV PowerFactory simulering hvor der er overspænding og effektfaktoren er leading



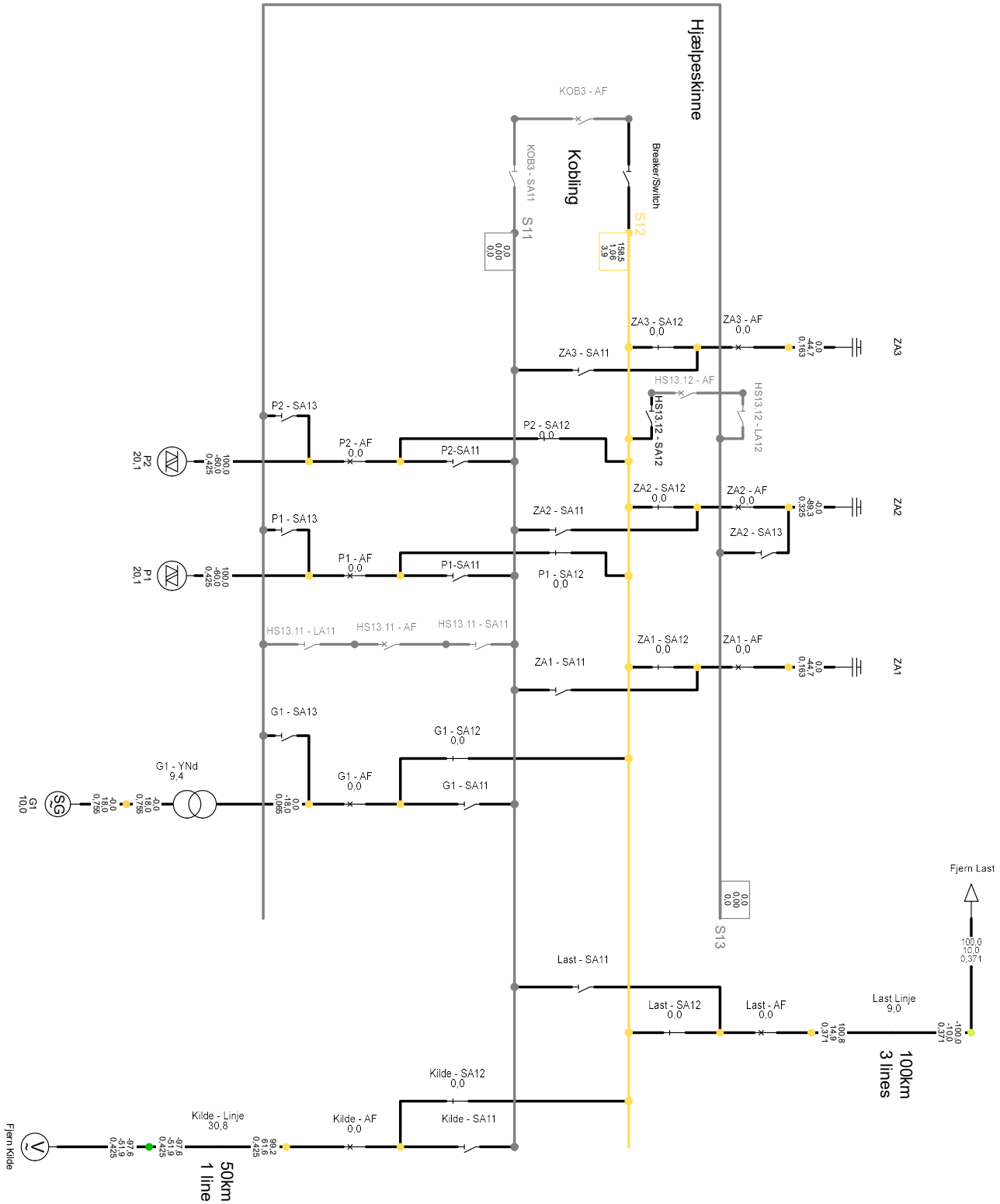
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

XVI PowerFactory simulering hvor der var overspænding og effektfaktoren var leading. Effektkontrol



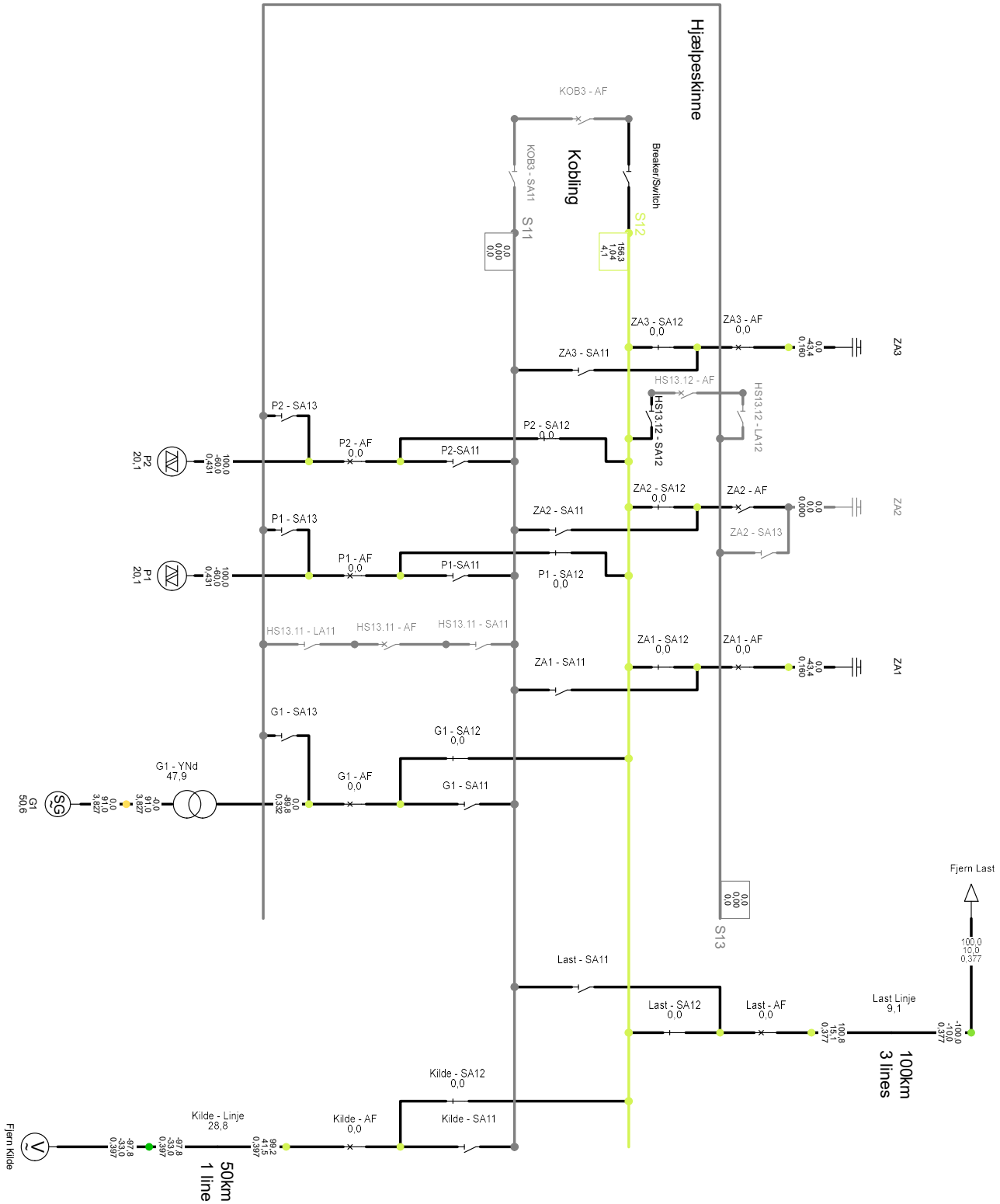
Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

XVII PowerFactory simulering hvor der var overspænding og effektfaktoren var leading. Spændingskontrol



Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence

XVIII PowerFactory simulering hvor synkronmaskins referencepunkt blev ændret



Created with DigSILENT PowerFactory Education Licence