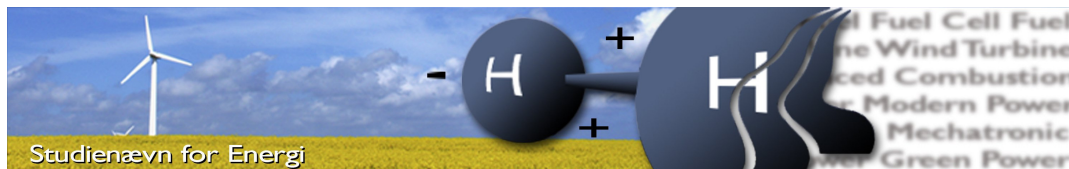


*Udbygning og forstærkning af
Energinet.dk's 400 kV linje
Idomlund - Tjele.*



DIPLOMINGENIØRPROJEKT
INSTITUT FOR ENERGITEKNIK
AALBORG UNIVERSITET
DEN. 14. SEPTEMBER 2016



7 semester v/ Det Teknisk-
Naturvidenskabelige Fakultet
Energi
Pontoppidanstræde 110
9000 Aalborg
<http://www.tnb.aau.dk>

Titel: Udbygning og forstærkning af
Energinet.dk's 400 kV linje Idomlund -
Tjele.

Projekt:

Diplomingeniør projekt

Projektperiode:

Juli 2016 - September 2016

Deltagere:

Jørgen R. Offersen

Vejledere:

Filipe Miquel Faria Da Silva

Synopsis:

Denne rapport tager udgangspunkt i fluxkoblingens påvirkning af lederne, på den ny 400 kV forbindelse mellem Idomlund og Tjele. Der vil i forbindelse med udledningen af serie impedans og shunt admittans, blive gennemgået teorierne dette bygger på. Her i vil indgå begreberne om en leders egen fluxkobling og den gensidige fluxkobling. Pi-modellen vil blive beskrevet og anvendt ved udledning af spændingsfald og derved linjens aktive og reaktive effekt-tab. Der vil afsluttes ved konklusion, hvilken indflydelse ledernes geometriske placering har.

Oplagstal: 1

Sidetal: 33

Appendiks:

Afsluttet 14-09-2016

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatteren.

Forord

Denne rapport udgør mit afgangprojekt ved min uddannelse til diplomingeniør i bæredygtig energiteknik, med elektrisk energi som speciale. Uddannelsen er udbudt ved Aalborg Universitet. Projektet har forløbet i 10 uger, med start fra den 1. juli 2016 og frem til og med den 14. september 2016.

Gennem hele projektperioden har jeg modtaget kompetent hjælp fra min vejleder Filipe Miguel Faria da Silva, som jeg har holdt vejledermøde med ca. hver anden uge.

Læsevejledning

Der vil igennem rapporten fremtræde kildehenvisninger, og disse vil være samlet i en litteraturliste bagerst i rapporten. Der er i rapporten anvendt kildehenvisning efter Harvardmetoden, så i teksten refereres til en kilde med [Efternavn, År]. Står kilden inden punktummet i en sætning dækker kilden udsagn i denne sætning, står kilden efter punktummet refererer kilden til hele afsnittet. Hvis der er flere kilder med samme forfatter, er der et bogstav efter årstallet. Henvisningen fører til litteraturlisten, hvor kilder er angivet med forfatter, titel, udgave, forlag, hyperlink, dato, osv. Figurer, tabeller, formler og udregninger er nummereret i henhold til kapitel, dvs. den første figur i kapitel 4 har nummer 4.1, den anden, nummer 4.2 osv.. Forklarende tekst til figurer og tabeller findes under de givne figurer og tabeller.

Jørgen R. Offersen

Summary in English

Expansion and reinforcement of Energinet.dk's 400 kV transmission line Idomlund - Tjele

The report is mainly focused on flux linkage between the conductors in a 400 kV overhead line:

The report begins with a brief introduction of the electric grid. The company Energinet.dk will be described, and the interest in an expansion of transmission line on the west coast. Also what this expansion will mean to the existing transmission network. There will through the project primarily be focused on flux linkage between the conductors and the consequence of this. In connection with the derivation of the required parameters, will require a certain insight into the theories. The theories will be introduced up to the section where it bin used in the actual derivation. There will be analysed at the current system of a 400 kV line, where approximately $1/5$ of the line is mounted with a 150 kV line on the same carrier tower. There will be analysed on the new line, which consists of two parallel 400 kV lines without transposition for the entire length. There will be seen on the consequence of a second phase order in the carrier tower.

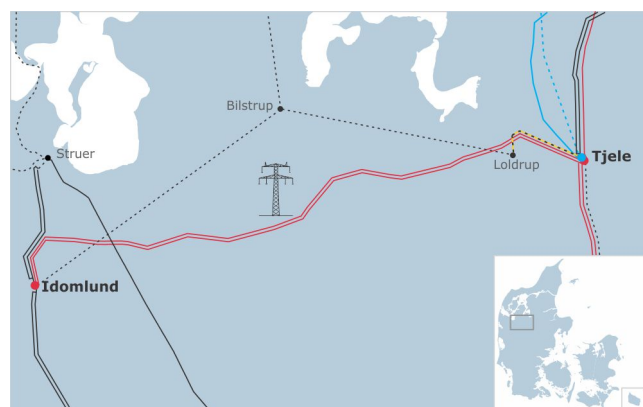
There will of both lines be derived series impedance and shunt admittance. This derivation will be describe the physical constants for the leaders to be used. Both series impedance and shunt admittance will be presented by matrices. The theory of symmetrical components will be described and used for the calculations. After the discharge of impedance and admittance will PI model will be described. Two models will be described, the short and the long PI model. There will be introduced the theory of two-port networks. These models will be used to calculate the voltages and currents on the line. Losses for the will be calculated, and the total power of transmitting from sending end. The power loss is calculated for the new line. In appendiks the calculations will be to find in form of matlab scipts. With a conclusion, the results will be listed up.

Indholdsfortegnelse

Forord	v
Summary in English	vii
Kapitel 1 Indledning	1
Kapitel 2 Eksisterende forbindelse Idomlund - Tjele	3
2.1 Loldrup - Tjele 12 km 150 kV og 400 kV	5
2.1.1 Serie impedans	5
2.1.2 Shunt admittans	11
2.2 Idomlund - Loldrup 61 km 400 kV	15
2.2.1 Serie impedans	15
2.2.2 Shunt admittans	17
2.3 Spændingsfald ved PI-model	18
2.3.1 Kort PI model	19
2.3.2 Mellem PI model	20
2.3.3 Spændingsfald og tab på linjen fra Idomlund til Tjele	21
Kapitel 3 Udbygget 400 kV forbindelse Idomlund - Tjele	25
3.0.1 Serie impedans	25
3.0.2 Shunt admittans	28
3.0.3 Beregning af spændingsfald på den nye linje mellem Idomlund og Tjele	30
Kapitel 4 Konklusion	33
Litteratur	35
Appendiks A Beregninger på eksisterende system 12km. Print af matlab scrip	37
Appendiks B Beregninger på eksisterende system 61 km. Print af matlab scrip	
Appendiks C Beregninger på nyt system. Print af matlab script	

Indledning 1

Med den store tilgang af alternative energikilder, som vindmøller og solceller, har Energinet.dk planlagt en udvidelse af den jyske vestkyst 400 kV net. Udvidelsen vil hovedsageligt bidrage til opsamling af produktionen fra lokale vindmøller i Vestjylland. Samtidig vil den ny forbindelse styrke nettet i forhold til handel med energi til udlandet. Ved den nye konstruktion er der to parallelle linjer. Dette giver det en større forsyningsikkerhed til forbrugerne. Opstår der fejl på den ene linje og derved bliver udkoblet, vil den anden linje i de fleste tilfælde kunne fortsætte med forsyningen. Figuren nedenfor viser den nye linje med de to parallelle 400 kV ført i bæremaster og 150 kV der er planlagt at føre som kabler i jorden. Linjen er



Figur 1.1. Figuren viser den nye 400 kV dobbelt linjes placering geografisk [Energinet.dk, 2013]

i alt 73 km. lang og vil kunne bære en belastningsstrøm på op til 2,76 kA. På den måde vil kapaciteten af energi transmissionen blive fordoblet. Det betyder der kan transmitteres en effekt på ca. 1900 MVA.

Tilslutningspunkt	Tracélængde	Maksimal driftsspænding	Kapacitet
Idomlund-Tjele	73 km	420 kV	2.760 A
Loldrup-Tjele	12 km	170 kV	925 A

Referencer

Figur 1.2. Figuren viser data for 400 kV linjen og 150 kV linjen efter udbygningen. [Energinet.dk, 2013]

Problem afgrænsning:

Det er formålet at påvise fluxkoblingens påvirkning af lederne mellem de to nye linjer. Derfor vil der ikke blive udført beregning af spændingsfald og effekttab på 150 kV linjen mellem Loldrup og Tjele. Der antages at systemet er balanceret, hvorfor der kun anvendes positiv sekvens for beregning af serie impedans og shunt admittans. Der skal ikke dimensioneres beskyttelses relæer, hvorfor der ikke udføres kortslutnings beregninger. Hverken for 2 faset kortslutning eller 3 faset kortslutning. Systemet afgrænses ved at negligere nul- og jord-leder og simplificere beregningerne.

Problemformulering:

Det initierende problem består i at påvise virkningen af fluxkoblingen mellem luftledningerne på den eksisterende linje og den nye linje. Desuden at værdi sætte den reaktive effekt på linjen samt spændingsfald, som følge af fluxkoblingen.”

Eksisterende forbindelse

Idomlund - Tjele

2

Dette kapitel indledes med en beskrivelse af den eksisterende højspændingslinje, mellem Tjele og Idomlund. Linjen er en 400 kV luftledning, på i alt 73 km. På en del af forbindelsen er ført en 150 kV linje placeret i samme mast. Strækningen med de to linjer går fra Tjele til Loldrup, og er 12 km. lang. Ledningerne er ophængt i en Donaumast [2.1] ved isolatorer, der forhindrer faserne i kontakt til stålmaster. På systemet mellem Tjele og Loldrup vil der kun være leder placeret på den øverste



Figur 2.1. Billedet viser en Donaumast med en lignende positionering af trådene.

travers for 150 kV. Det er dem som ses til venstre på billedet. Desuden vil linjen for 400 kV også være placeret på masten. Denne linje er fordelt med en leder på øverste travers og to leder på den nederste travers. Den kan ses på billedet i højre side. Til at beregne linjens serie impedans og shunt admittans skal data for lederne og distancer mellem disse anvendes. Data for systemet er indført i tabellen [2.1]. Der er valgt en "Martin duplex" for 400 kV linjen og en "Martin single" for 150 kV linjen. Til jordlederen er der anvendt en "Dorkin". De er alle af typen ACSR. Denne type leder er en kombination af aluminium og stål [refappendiks]¹. De oplyste

¹FiXme Fatal: Der mangler reference

Lederdata

	400 kV	150 kV	Jordtråd
Type:	<i>Martin</i>	<i>Martin</i>	<i>Dorkin</i>
Konfiguration:	<i>Duplex</i>	<i>Single</i>	<i>Single</i>
Tværsnit areal:	772,06 mm ²	772,06 mm ²	152,80 mm ²
Materiale:	<i>ACSR</i>	<i>ACSR</i>	<i>ACSR</i>
Duplex afstand:	0,4 m	–	–
Diameter:	36,17 mm	36,17 mm	16,01 mm
Resistans:	0,0212 Ω/km	0,0423 Ω/km	0,0277 Ω/km

Table 2.1. Data for the used conductors. These are partly disclosed by Energinet.dk. Some are taken from the data sheet. [OMAN, 2016]

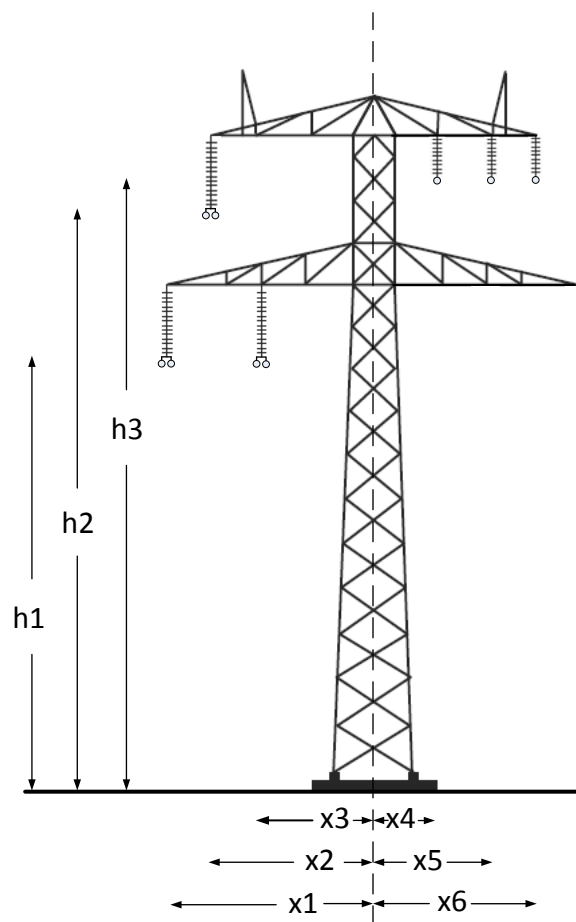


Figure 2.2. On the drawing, a Donau tower is shown, with 400 kV on the left side distributed on both cross-arms, and 150 kV placed on the upper cross-arm on the right side.

data will be used for calculation of the line's series impedance and shunt admittance. The results will later be used for calculation of the voltage drop for the line, using the PI-model.

Horisontale mål		Vertikale mål	
x1	12,92 m	h1	25,00 m
x2	10,37 m	h2	33,80 m
x3	7,17 m	h3	36,10 m
x4	4,05 m	–	—
x5	7,60 m	–	—
x6	10,37 m	–	—

Tabel 2.2. X-målene er vandret med udgangspunkt fra mastecenter. Værdien for h er højden fra jordoverfladen til leder i mast.

2.1 Loldrup - Tjele 12 km 150 kV og 400 kV

I dette afsnit vil der blive set på den 12 km. lange forbindelse mellem Tjele og Loldrup. Der er valgt at dele afsnittet op i to underafsnit. Et for serie impedans og et for shunt admittans. Der vil blive udledt induktansen for linjen, samt impedans. Desuden vil der blive udledt shunt admittans for linjen. For at opnå den fulde fluxkobling skal den gensidig kobling fra 150 kV, samt potentialet mellem lederne betragtes og medregnes. Dette vil resultere i den samlede serie impedans og shunt admittans for de 12 km. mellem Tjele og Loldrup. ACSR leder der anvendes til luftledning er opbygget af et antal bundtede mindre ledere. Disse mindre ledere vil være snoet om hinanden og ofte i flere lag til en samlet og fleksibel leder. De inderste tråde er fremstillet af stål og de yderste af aluminium. Denne kombination er valgt for at få den store trækstyrke i stålet og den lave resistivitet $[\rho]$ der er i aluminium. En leder fremstillet af kobber vil have en meget lav resistivitet, men har ikke særlig stor trækstyrke, samtidig er kostprisen for kobberleder meget større. Den mest præcise måde at finde en ækvivalent radius for en sådan leder vil kræve en længere udregning og derved et stort tidsforbrug. Det har erfaringsmæssigt vist sig at der ved anvendelse af radius ud fra den fysiske diameter, vil opnås små negligerbare afvigelser [Bergen og Vittal, 2006][Kap.3.2]. Der vil derfor blive anvendt metoden ud fra den fysiske diameter [2.1]. I datablad for ACSR Martin [OMAN, 2016] kan aflæses en diameter på [36,17mm].

2.1.1 Serie impedans

Serie impedans $[Z]$ defineres ved.

$$Z = R + jX \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

Hvor R er lederens resistans $[R_{dc}]$ og imaginær delen $[jX]$ er reaktansen.

DC resistans.

DC resistansen for en solid rund leder, ved en given temperatur er.

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A} \quad [\Omega/m] \quad (2.2)$$

Hvor :

$$\begin{aligned}\rho &= \text{lederens resistivitet} && [\Omega mm^2/m] \\ l &= \text{lederens længde} && [m] \\ A &= \text{lederens tværsnitareal} && [mm^2]\end{aligned}$$

Ved en stigende temperatur i lederen, øges resistansen. Denne udvikling vil være lineær med temperatur intervallet.

$$R = R_{20} (1 + \alpha (t - 20)) \quad [\Omega] \quad (2.3)$$

Hvor:

$$R_{20} = \text{lederens resistans ved } 20^\circ C \quad [\Omega] \quad (2.4)$$

$$t = \text{aktuel temperatur} \quad [^\circ C] \quad (2.5)$$

$$\alpha = \text{temperatur koefficienten for lederens materiale} \quad [^\circ C^{-1}] \quad (2.6)$$

$$\alpha_{Alu} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ [Jewett og Serway, 2010][s.814]} \quad [^\circ C^{-1}] \quad (2.7)$$

Det vil være hensigtsmæssigt at hente værdien for lederens resistans $[r_i]$ fra producentens datablad. På 150 kV linjen er der en leder for hver fase. Lederens resistans fra datablad, kan derfor direkte anvendes. Værdien er typisk opgivet i $[\Omega/km]$. På 400 kV linjen anvendes 2 parallelle leder for hver fase. Det vil derfor være nødvendigt at beregne fasens totale resistans $[r_i]$.

$$r_{i1} = 0,0422 \quad [\Omega/km] \quad (2.8)$$

$$r_{i2} = \frac{\rho l}{A \cdot n} = \frac{R_{dc}}{2} = 0,0212 \quad [\Omega/km] \quad (2.9)$$

Hvor:

$$n = \text{antal leder} \quad (2.10)$$

$$l = \text{lederens længde} \quad (2.11)$$

$$\rho = 0,0422 \quad [\Omega/km] \text{ [OMAN, 2016]} \quad (2.12)$$

Skin effekt.

Når lederen bliver pålagt en AC spænding vil strømdensiteten blive asymmetrisk fordelt i lederen. Densiteten vil tiltage tæt ved lederens yderste skal, og aftage ind mod center. Dette fænomen kaldes for skin effekt. Denne vil være afhængig af lederens resistivitet $[\rho]$ og frekvens $[H_z]$. Skin deep er defineret ved [2.13].

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} \quad (2.13)$$

Hvor:

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_r \cdot \mu_0 && [H/m] \\ \mu_r &= \text{relative permabiliteten for en ikke magnetisk leder} = 1 && [H/m] \\ \mu_0 &= \text{permabiliteten for vacuum} = 8,85 \cdot 10^{-12} && [H/m] \\ \rho &= \text{lederens resistivitet} && [\Omega \cdot m] \\ \omega &= \text{Vinkelfrekvens} = 2 \cdot \pi \cdot \text{frekvens} && [rad/s]\end{aligned}$$

For luftledninger gælder, er indtrængnings dybden meget mindre end lederens radius ($\delta \ll r_c$), kan denne effekt negligeres. Det gør sig ikke gældende for kabler. Skin effekten er meget lille ved 50 Hz, og vil derfor ofte blive neglegeret ved denne frekvens. I særlige situationer med meget store strømstyrker vil skin effekten dog kunne tages i betragtning [Silva, 2015].

Geometrisk middel radius (GMR).

Den geometriske middel radius for en enkelt leder [r'] udregnes ved ligning [2.14]. Hvor r er lederens radius, hvor på der ganges en faktor ($e^{-\frac{1}{4}} \approx 0,7788$).

$$r' = r \cdot e^{-\frac{1}{4}} = 14 \cdot 10^{-3} \quad [m] \quad (2.14)$$

Der vil ved de høje spændinger typisk anvendes flere leder for hver fase. Det kan være fra 2 til n antal ledere. Ved flere leder beregnes den geometrisk radius (D_s^b) for den enkelte fase. Dette udføres ved at anvende ligning [2.15].

$$D_s^b = \sqrt[n]{r' \cdot d_{12} \cdot d_{13} \cdots d_{1n}} \quad [m] \quad (2.15)$$

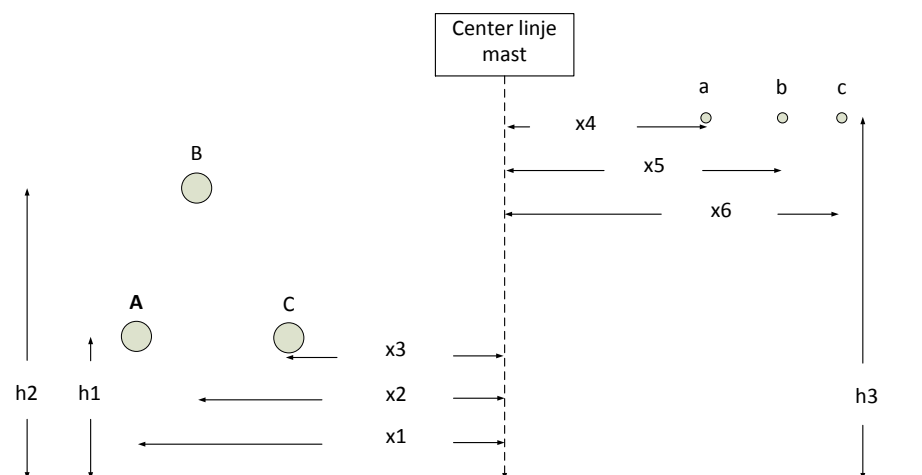
Hvor n er antallet af del leder i bundet. I ligning [2.15] indeholder bundet 2 leder, ($n = 2$). Ved anvendelse af denne ligning vil det være muligt at udregne GMR for bundter med op "n"antal leder. Distancen [d_{xx}] er afstanden mellem en valgt leder og alle de øvrige del-leder. På 400 kV linjen er anvendt to leder for hver fase. Der skal derfor udregnes en geometrisk middel radius (GMR) for den enkelte fase. Der regnes med et bundt på to leder, ved en "Martin Duplex". Data fra tabel [2.2] indsættes i ligningen.

$$D_s^b = \sqrt{r' \cdot d_{12}} = \sqrt{14,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4} = 75,05 \cdot 10^{-3} \quad [m] \quad (2.16)$$

Hvor [d_{12}] er afstanden mellem de to parallelle leder. Resultatet af den nye ækvivalent radius [D_s^b] er opgivet i meter [m]. Alle de øvrige distancer der udregnes vil også være opgivet i enheden meter [m].

Fluxkobling og induktans

Ved udledning af induktans matricen skal distancerne mellem de involverede leder anvendes. Distancerne udledes ud fra tegning over masten med ophæng for



Figur 2.3. Tegningen viser et ækvivalent system med to leder omregnet til en.

leder. Tegningen nedenfor [2.3] er en ækvivalent for den geometriske placering på Donaumasten. Der er tegnet en leder på som ækvivalent for lederbundt, bestående af de to leder [2.16]. Jordlederen er negligeret, for at simplificere udregningen af induktansen. Alle distancer mellem lederne er udledte og sat ind i tabellen [2.3]. Beregningerne kan ses i bilag [B] Den generelle ligning der beskriver fluxkoblingen for

	A	B	C	a	b	c
A	0,075	9,16	5,75	20,28	23,33	25,80
B	9,16	0,075	9,36	14,60	18,12	20,86
C	5,75	9,36	0,075	15,78	18,48	20,76
a	20,28	14,60	15,78	0,014	3,55	6,32
b	23,33	18,17	18,48	3,55	0,014	2,77
c	25,80	20,87	20,76	6,32	2,77	0,014

Tabel 2.3. Tabel over distancer mellem lederne ophængt i masten. Diagonalen er værdier for ledernes egen fluxkobling.

en leder er som følgende. Hvor det første led i parentes er den interne fluxkobling. De resterende led er den eksterne fluxkobling.

$$\lambda_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(I_1 \cdot \ln \left(\frac{1}{r'} \right) + I_2 \cdot \ln \left(\frac{1}{D_{12}} \right) + \dots + I_n \cdot \ln \left(\frac{1}{D_{1n}} \right) \right) \quad [Wb] \quad (2.17)$$

Hvor:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [H/m]$$

Ligningerne kan sættes ind i matrix form, som er en mere bekvem form at opskrive dem på.

$$\lambda = LI \quad [Wb] \quad (2.18)$$

Den kan opskrives i kompakt form.

$$\lambda_i = L_{ii}I_i + \sum_{j=1}^n L_{ij}I_j ; j \neq i \quad [Wb] \quad (2.19)$$

Ligning for hver leder sættes ind i matrix. Hvor induktansen er et forholdstal mellem fluxen og strømmen. Udtrykket for induktansen bliver derfor.

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad [H] \quad (2.20)$$

Impedansen bliver derfor:

$$Z = R + j \cdot \omega \cdot L \quad [\Omega] \quad (2.21)$$

Impedans matrixen kan nu udledes ved de grundlæggende ligninger.

$$Z_{ii} = r_i + r_d + j \cdot \omega \cdot L \quad [\Omega] \quad (2.22)$$

$$Z_{ij} = r_i + j \cdot \omega \cdot L \quad [\Omega] \quad (2.23)$$

Hvor både lederens resistans $[r_i]$ og jordens resistans $[r_d]$ indgår i ligningerne. Diagonalen i matrixen indeholder ligning for egen impedans [2.22]. De resterende elementers værdier er for den gensidige impedans 2.14. Her indgår kun jordens resistans $[r_d]$. Ligningerne for alle faseleder opskrives efter [2.17] og sættes ind i matrixen. Ved at benytte ligning 2.20 opnås induktans matrixen L. Ud fra ligning 2.22 og ligning 2.23 ganges L med $[j\omega]$. Derved fås impedans matrixen $[Z]$.

$$Z = J \cdot \omega \cdot L \quad [\Omega] \quad (2.24)$$

Værdierne fra tabel [2.3] sættes ind i matrixen og beregnes. Resultatet vises i matrix [2.25], som er delt op fire delmatrixer. Impedans matrixen er delt op på følgende måde.

$$\left[\begin{array}{c|c} Z1^{abc} & Z2^{abc} \\ \hline Z3^{abc} & Z4^{abc} \end{array} \right] \quad (2.25)$$

De fire delmatrixer er vist med værdierne indsat.

$$Z1^{abc} = \begin{bmatrix} 7.05e-5 + j5.92e-4 & 4.93e-5 + j2.9e-4 & 4.93e-5 + j3.2e-4 \\ 4.93e-5 + j2.9e-4 & 7.05e-5 + j5.92e-4 & 4.93e-5 + j2.89e-4 \\ 4.93e-5 + j3.2e-4 & 4.93e-5 + j2.89e-4 & 7.05e-5 + j5.92e-4 \end{bmatrix} \quad [\Omega]$$

$$Z2^{abc} = \begin{bmatrix} 4.93e-5 + j2.4e-4 & 4.93e-5 + j2.32e-4 & 4.93e-5 + j2.25e-4 \\ 4.93e-5 + j2.61e-4 & 4.93e-5 + j2.48e-4 & 4.93e-5 + j2.39e-4 \\ 4.93e-5 + j2.56e-4 & 4.93e-5 + j2.46e-4 & 4.93e-5 + j2.39e-4 \end{bmatrix} \quad [\Omega]$$

$$Z3^{abc} = \begin{bmatrix} 4.93e-5 + j2.4e-4 & 4.93e-5 + j2.61e-4 & 4.93e-5 + j2.56e-4 \\ 4.93e-5 + j2.32e-4 & 4.93e-5 + j2.48e-4 & 4.93e-5 + j2.46e-4 \\ 4.93e-5 + j2.25e-4 & 4.93e-5 + j2.39e-4 & 4.93e-5 + j2.39e-4 \end{bmatrix} \quad [\Omega]$$

$$Z4^{abc} = \begin{bmatrix} 9.16e-5 + j6.97e-4 & 4.93e-5 + j3.5e-4 & 4.93e-5 + j3.5e-4 \\ 4.93e-5 + j3.5e-4 & 9.16e-5 + j6.97e-4 & 4.93e-5 + j3.66e-4 \\ 4.93e-5 + j3.14e-4 & 4.93e-5 + j3.66e-4 & 9.16e-5 + j6.97e-4 \end{bmatrix} \quad [\Omega]$$

Hvor:

$$Z1^{abc} = \text{Intern fluxkobling mellem 400 kV leder} \quad (2.26)$$

$$Z2^{abc} = 150 \text{ kV fluxkobling til 400 kV} \quad (2.27)$$

$$Z3^{abc} = 400 \text{ kV fluxkobling til 150 kV} \quad (2.28)$$

$$Z4^{abc} = \text{Intern fluxkobling mellem 150 kV leder} \quad (2.29)$$

Ved at kigge på diagonalen for hver del-matrice, ses at værdien for real delen skiller sig ud fra de øvrige matrice elementer. Dette skyldes der både indgår værdien for $[r_i]$ og $[r_d]$ [2.22]. Imaginær delen er værdien for lederens egen induktans. I de resterende matrice elementer indgår kun $[r_d]$ [2.23] i realdelen. Her varierer imaginær delen fra element til element. Det skyldes den gensidige induktans mellem faserne, som variere grundet den asymmetriske placering. Det vælges at transformere impedans matricen over til sekvens matrix. Ved transformeringen deles faserne op i en positiv sekvens, en negativ sekvens og en nul sekvens. Der anvendes transformation matricen $[T]$.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Hvor faktoren a defineres med.

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0.5 + j0.866$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0.5 - j0.866$$

Transformeringen kan skrives i matrix form.

$$[Z^{+-0}] = [T]^{-1} [Z^{abc}] [T] \quad [\Omega] \quad (2.31)$$

Matricen deles op fire delmatricer.

$$\left[\begin{array}{c|c} Z1^{+-0} & Z2^{+-0} \\ \hline Z3^{+-0} & Z4^{+-0} \end{array} \right] \quad (2.32)$$

De fire delmatricer er vist med værdierne indsat.

$$Z1^{+-0} = \begin{bmatrix} 2.11e-5 + j2.93e-4 & 1.69e-5 - j1.07e-5 & 8.45e-6 + j5.33e-6 \\ -1.69e-5 - j1.07e-5 & 2.11e-5 + j2.93e-4 & -8.45e-6 + j5.33e-6 \\ -8.45e-6 + j5.33e-6 & 8.45e-6 + j5.33e-6 & 1.69e-4 + j0.00119 \end{bmatrix} \quad [\Omega]$$

$$Z_{2^{+-0}} = \begin{bmatrix} -1.79e-6 - j8.76e-7 & -7.68e-7 - j1.66e-6 & -1.67e-6 - j1.57e-5 \\ 7.68e-7 - j1.66e-6 & 1.79e-6 - j8.76e-7 & 1.67e-6 - j1.57e-5 \\ 6.5e-6 + j1.45e-5 & -6.5e-6 + j1.45e-5 & 1.48e-4 + j7.29e-4 \end{bmatrix} \quad [\Omega]$$

$$Z_{3^{+-0}} = \begin{bmatrix} 1.79e-6 - j8.76e-7 & -7.68e-7 - j1.66e-6 & -6.5e-6 + j1.45e-5 \\ 7.68e-7 - j1.66e-6 & -1.79e-6 - j8.76e-7 & 6.5e-6 + j1.45e-5 \\ 1.67e-6 - j1.57e-5 & -1.67e-6 - j1.57e-5 & 1.48e-4 + j7.29e-4 \end{bmatrix} \quad [\Omega]$$

$$Z_{4^{+-0}} = \begin{bmatrix} 3.18e-5 + j3.48e-4 & -1.05e-5 + j1.64e-5 & -1.05e-5 + j8.44e-7 \\ 1.05e-5 + j1.64e-5 & 5.28e-5 + j3.48e-4 & 1.05e-5 + j8.44e-7 \\ 6.1e-20 - j1.73e-5 & -4.74e-20 - j1.73e-5 & 1.9e-4 + j0.00140 \end{bmatrix} \quad [\Omega]$$

Ved balanceret system er negativ sekvens = 0, og nul sekvens = 0. Dette er ikke helt korrekt ved assymetrisk fase placering. Da flukskoblingen differentiere på grund af de forskellige afstande. Bidraget fra negativ sekvens og nul sekvens er dog meget lille, hvorfor bidraget fra disse kan negligeres. Derfor vil det være værdien fra positiv sekvensen der anvendes. Værdien for positiv sekvens aflæst i $[Z_{1,1}]$ er serie impedans for linjen $[\Omega/m]$. Denne vil blive anvendt senere i PI modellen til beregning af spændingsfald på linjen.

$$Z^+ = (2.11 + j29,3) \cdot 10^{-5} \quad [\Omega/m] \quad (2.33)$$

2.1.2 Shunt admittans

I dette underafsnit vil shunt admittans blive beregnet for linjen. Admittans fastsættes af konduktiviteten og kapacitansen mellem lederne. Konduktiviteten er et udtryk for ledeevnen mellem faserne. Det vil derfor være krybestrømme på isolatorernes overflade og corona der har indflydelse på konduktansen. Disse er meget små og derfor blive negligeret. Det vil derfor kun være kapacitansen der udledes. Hvor real delen er = 0

$$Z = R + jX = \frac{1}{j\omega C} \quad [\Omega/m] \quad (2.34)$$

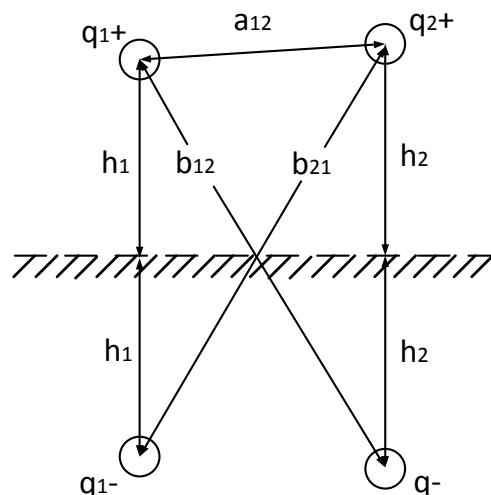
Admittans defineres ved.

$$Y = \frac{1}{Z} = j\omega Cl \quad [S/m] \quad (2.35)$$

Hvor $[l]$ er linjens længde.

Ved udledningen af potentialet mellem lederne, på højspændingslinjen, skal der placeres en ækvivalent leder i jorden². Lederen skal være placeret med samme dybde i jorden, som den aktuelle leder i luften er placeret over jorden. Denne ækvivalent leder kaldes for en spejling af luftledningen. På figuren [2.4] vises et eksempel med to leder og spejlingen i jorden. Ladningen for lederen i jorden er modsat polaritet af lederen i luften.

²Fixme Fatal: kilde



Figur 2.4. Figuren viser to leder placeret i luften med den ækvivalente spejling for jordleder placeret under jordoverfladen. Figuren er tegnet ved inspiration fra kursus materiale [Silva, 2015].

Set fra $[q_1]$ er potentialet mellem to leder, med ladningen q , defineret ved.

$$V_{\Delta} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \left(q_1 \ln \frac{b_{11}}{a_{11}} + q_2 \ln \frac{b_{12}}{a_{12}} \right) \quad [V] \quad (2.36)$$

Hvor epsilon ϵ er permitiviteten for luft. $[a_{11}]$ er lederens radius og værdien under brøkstregen $[b_{11}]$ er afstanden fra leder 1 til lederens egen spejlings punkt under jorden.

$$\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \quad [F/m] \quad (2.37)$$

$$a_{11} = r \quad [m] \quad (2.38)$$

$$b_{11} = 2 \cdot h_1 \quad [m] \quad (2.39)$$

Ligningen kan skrives i den kompakte form.

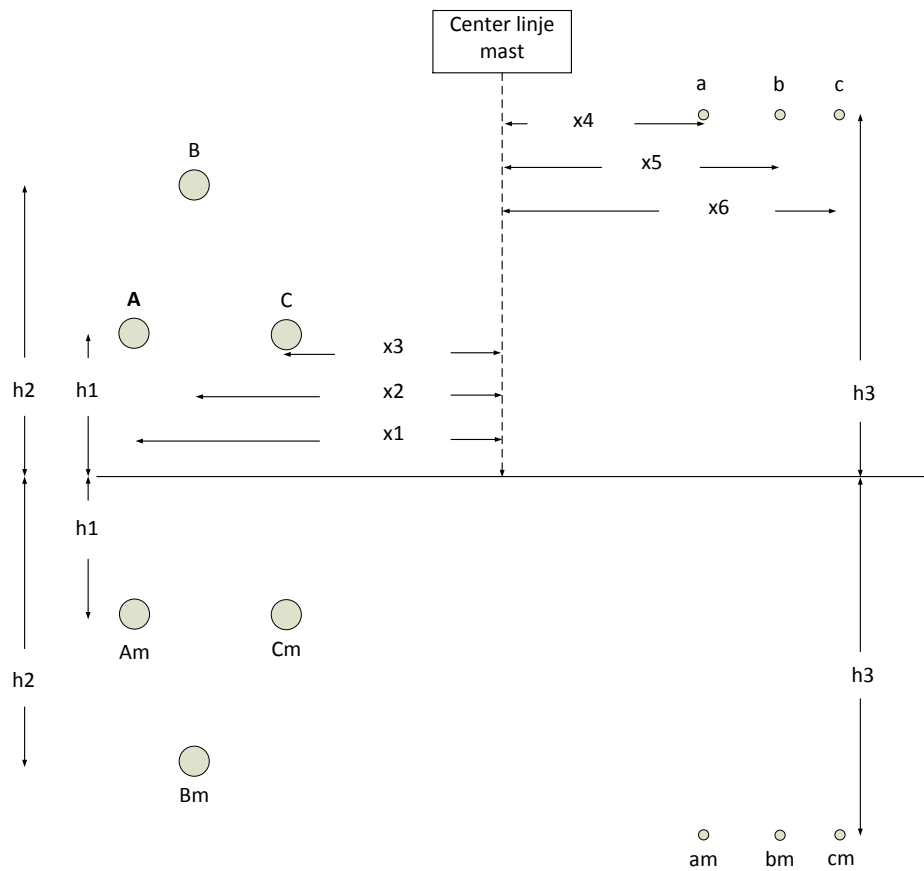
$$V_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{k=1}^n q_k \ln \frac{D_{kj}}{D_{ki}} \quad [V] \quad (2.40)$$

Relationen mellem ladningen $[q]$, kapacitansen $[C]$ og potentialet $[P]$ defineres ved følgende.

$$q = CV \quad [C] \quad (2.41)$$

$$C = P^{-1} \quad [F] \quad (2.42)$$

På figuren ses en ækvivalent tegning af systemet, med denne spejling. Tegningen viser de geometriske mål for placering af lederne. De udledte distancer mellem lederne og de ækvivalente leder i jorden udregnes og sættes ind i tabel [2.4] og tabel [2.5]. Disse anvendes ved beregning af admittansen.



Figur 2.5. Figuren er en ækvivalent tegning af ledernes placering, med spejlingerne i jorden.

Distance mellem faseleder i luften [m]						
	A	B	C	a	b	c
A	0,075	9,16	5,75	20,28	23,33	25,80
B	9,16	0,075	9,36	11,45	14,95	17,70
C	5,75	9,36	0,075	15,78	18,48	20,76
a	20,28	14,60	15,78	0,018	3,55	6,32
b	23,33	18,12	18,48	3,55	0,018	2,77
c	25,80	20,87	20,76	6,32	2,77	0,018

Tabel 2.4. Data i tabellen er distancer mellem faselederne. Målene er opgivet i meter [m].

Distance fra faseleder til ækvivalent [m]						
	A	B	C	a	b	c
A	39,33	48,20	39,75	53,21	54,45	55,55
B	48,20	56,93	48,24	60,29	61,05	61,78
C	39,75	48,24	39,33	51,97	52,55	53,40
a	53,21	60,96	51,67	61,53	61,66	61,86
b	54,45	61,90	52,55	61,64	61,53	61,60
c	55,55	62,80	53,40	61,86	61,60	61,53

Table 2.5. Data i tabellen er distance fra faseleder til spejlinger. Målene er opgivet i meter. [m]

Ligningerne for fasernes potentiale udledes med ligning [2.40] og sætte ind i matricen og beregnes. Resultatet vises i [2.43]. Matricen deles op fire delmatricer.

$$\left[\begin{array}{c|c} Y1^{abc} & Y2^{abc} \\ \hline Y3^{abc} & Y4^{abc} \end{array} \right] \quad (2.43)$$

De fire delmatricer er vist med værdierne indsat.

$$Y1^{abc} = \begin{bmatrix} j3.22e-9 & -j5.6e-10 & -j8.06e-10i \\ -j5.47e-10 & j3.04e-9 & -j4.97e-10 \\ -j8.05e-10 & -j5.16e-10 & j3.25e-9 \end{bmatrix} [S/m]$$

$$Y2^{abc} = \begin{bmatrix} -j1.06e-10 & -j7.26e-11 & -j6.66e-11 \\ -j3.6e-10 & -j2.12e-10 & -j1.77e-10 \\ -j1.94e-10 & -j1.32e-10 & -j1.18e-10 \end{bmatrix} [S/m]$$

$$Y3^{abc} = \begin{bmatrix} -j1.2e-10 & -j2.89e-10 & -j2.08e-10 \\ -j7.99e-11 & -j1.76e-10 & -j1.39e-10 \\ -j7.2e-11 & -j1.51e-10 & -j1.23e-10 \end{bmatrix} [S/m]$$

$$Y4^{abc} = \begin{bmatrix} j2.6e-9 & -j6.73e-10 & -j3.92e-10 \\ -j6.72e-10 & j2.75e-9 & -j8.09e-10 \\ -j3.91e-10 & -j8.09e-10 & j2.61e-9 \end{bmatrix} [S/m]$$

Admittans matricen transformeres til sekvens matrice. Der vil indgå samme regler og matematiske metoder, som ved transformering af impedans matricen[2.30]. Transformeringen kan skrives i matrix form.

$$[Y^{+-0}] = [T]^{-1} [Y^{abc}] [T] \quad (2.44)$$

Matricen deles op fire delmatricer[2.45].

$$\left[\begin{array}{c|c} Y1^{+-0} & Y2^{+-0} \\ \hline Y3^{+-0} & Y4^{+-0} \end{array} \right] \quad (2.45)$$

De fire delmatricer er vist med værdierne indsat.

$$Y1^{+-0} = \begin{bmatrix} j3.79e-9 & j1.41e-10 & -j3.57e-11 \\ j1.41e-10 & j3.79e-9 & -j3.57e-11 \\ -j2.85e-11 & -j2.85e-11 & j1.93e-9 \end{bmatrix} [S/m]$$

$$Y2^{+-0} = \begin{bmatrix} j2.17e-11 & j3.22e-11 & j1.17e-10 \\ j3.22e-11 & j2.17e-11 & j1.17e-10 \\ -j9.04e-11 & -j9.04e-11 & -j4.79e-10 \end{bmatrix} [S/m]$$

$$Y3^{+-0} = \begin{bmatrix} j1.65e-11 & j2.11e-11 & -j8.22e-11 \\ j2.11e-11 & j1.65e-11 & -j8.22e-11 \\ j9.0e-11 & j9.0e-11 & -j4.52e-10 \end{bmatrix} [S/m]$$

$$Y4^{+-0} = \begin{bmatrix} j3.28e-9 & -j2.12e-10 & j6.45e-11 \\ -j2.12e-10 & j3.28e-9 & j6.45e-11 \\ j6.54e-11 & j6.54e-11 & j1.4e-9 \end{bmatrix} [S/m]$$

Fra tidligere informeret består shunt admittansen $[Y]$ kun af imaginær delen. Realdelen bestående af konduktansen negligeres. Værdien der aflæses i $\left[Y_{(1,1)}^{+-0} \right]$, som er positiv sekvensen, er shunt admittansen for linjen er $[S/m]$.

$$Y^+ = (j3,79) \cdot 10^{-9} [S/m] \quad (2.46)$$

Værdien anvendes senere i PI-modellen.

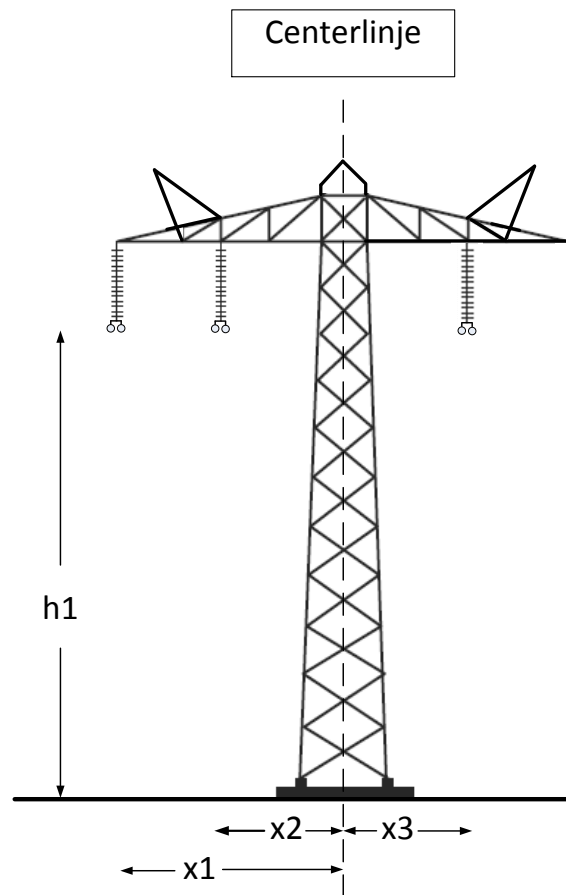
2.2 Idomlund - Loldrup 61 km 400 kV

I dette afsnit vil der blive beregnet serie impedans og shunt admittans på den nuværende linje, med en længde på 61 km. fra Loldrup til Idomlund. Linjen er den samme 400 kV linje der er beskrevet i det tidligere afsnit [2.1]. Der er kun en 400 kV linje på denne strækning, som er udført med en anden geometrisk placering af faserne. Faserne er placeret på den nederste travers. Der er derfor ikke monteret den øverste del på Donaumasten. Linjen er en "Martin duplex", og har derfor to parallelle leder bundtet for hver fase. Med dennes geometri skal afstande mellem faserne beregnes.

2.2.1 Serie impedans

For beregning af serie impedans udledes distancer for faseplaceringen. Der er indsat tegning af masten med målangivelse for faseplacering. Hvor x-målene er vandrette mål er og h-mål er højden.

Alle distancer mellem faserne sættes ind i tabel [2.7]. Grundet de to leder, i bundt på hver fase, anvendes ækvivalent radius $[D_s^b]$ for faseradius. Denne er regnet ved ligning [2.16]. Ligningerne for impedans udledes efter samme normer som i afsnit



Figur 2.6. Figuren viser mast for 61 km. 400 kV linje, fra Loldrup til Idomlund.

	Mål i meter
x1	12,92 m
x2	10,37 m
x3	7,17 m
h1	25.00 m

Tabel 2.6. Vandret og horisontal mål for masten

[2.1], og sættes ind i matricen. Resultatet bliver følgende.

$$[Z^{abc}] = \begin{bmatrix} 7.05e-5 + j5.92e-4 & 4.93e-5 + j3.2e-4 & 4.93e-5 + j2.41e-4 \\ 4.93e-5 + j3.2e-4 & 7.05e-5 + j5.92e-4 & 4.93e-5 + j2.62e-4 \\ 4.93e-5 + j2.41e-4 & 4.93e-5 + j2.62e-4 & 7.05e-5 + j5.92e-4 \end{bmatrix} \quad \Omega/m \quad (2.47)$$

Impedans matricen transformeres til sekvens matrice. Der vil indgå samme regler, som ved transformering af impedans matricen[2.31].

$$[Z^{+-0}] = [T]^{-1} [Z_{abc}] [T] \quad (2.48)$$

Distancer mellem faseleder			
	A	B	C
A	0,075	5,75	20,09
B	5,75	0,075	14,34
C	20,09	14,34	0,075

Tabel 2.7. Tabellen viser de udregnede distancer, opgivet i meter, mellem faserne

Den transformererede impedansmatricen bliver følgende.

$$[Z^{+-0}] = \begin{bmatrix} 2.1e-5 + j3.2e-4 & -4.5e-5 - j1.2e-5 & -2.3e-5 + j6.0e-6 \\ 4.5e-5 - j1.2e-5 & 2.1e-5 + j3.2e-4 & 2.3e-5 + j6.0e-6 \\ 2.3e-5 + j6.0e-6 & -2.3e-5 + j6.0e-6 & 1.7e-4 + j1.1e-3 \end{bmatrix} \quad \Omega/m \quad (2.49)$$

Værdien for positiv sekvens aflæst i Z^{+-0} er derfor serie impedans for en længde på en meter af linjen.

$$Z^+ = (2,12 + j31,80) \cdot 10^{-5} \quad [\Omega/m] \quad (2.50)$$

2.2.2 Shunt admittans

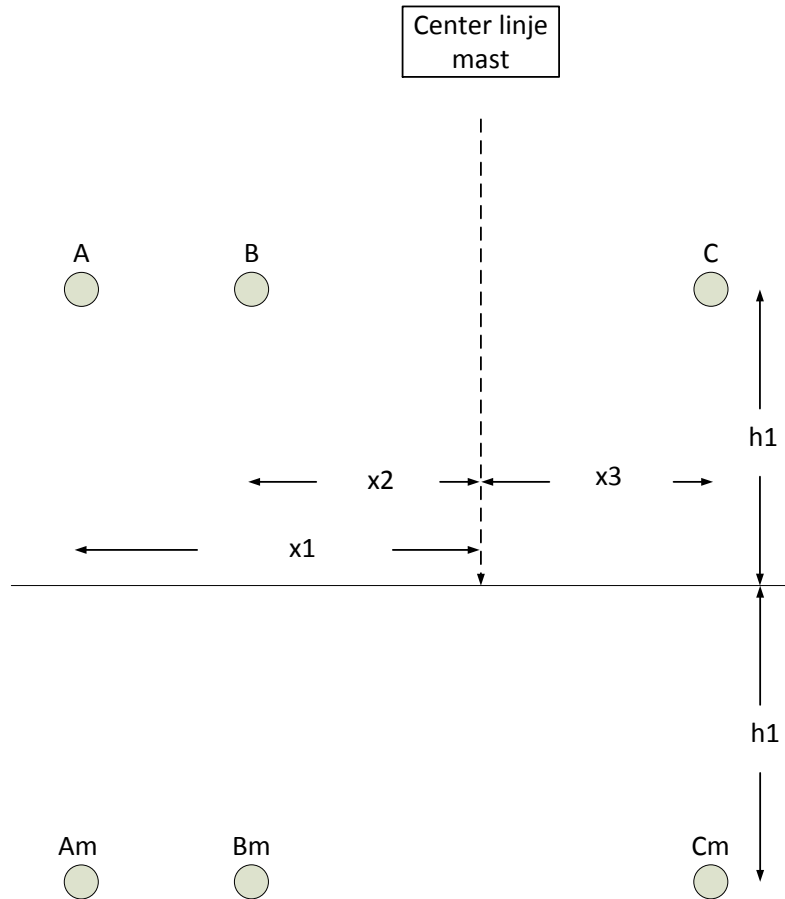
For beregning af admittans for 61 km. linje, mellem Loldrup - Idomlund, vil distancerne mellem lederne blive beregnet. Figuren viser ækvivalent tegning af faser, med spejling af leder i jorden. Det vil være både indbyrdes afstand mellem lederne. Og distance mellem leder og ækvivalent leder i jorden. Distancerne sættes ind i tabel [2.8],[2.9].

Distancer mellem luftleder			
	A	B	C
A	0,075	5,75	20,09
B	5,75	0,075	14,34
C	20,09	14,34	0,075

Tabel 2.8. Tabel indeholder distancer mellem faseleder

Distance mellem fase og ækvivalent			
	Am	Bm	Cm
A	39,33	39,75	44,17
B	39,75	39,33	41,87
C	44,17	41,87	39,33

Tabel 2.9. Tabel indeholder distancer mellem faseleder og spejling i jorden



Alle ligninger for potentialet udledes, i efter samme metode som i afsnit [??] og sættes ind i matrix [2.51].

$$[Y^{abc}] = \begin{bmatrix} j3.571e-9 & j1.3e-10 & -j2.295e-11 \\ j1.3e-10 & j3.571e-9 & -j2.295e-11 \\ -j2.295e-11 & -j2.295e-11 & j1.997e-9 \end{bmatrix} \quad [\Omega/m] \quad (2.51)$$

Admittans matricen transformeres til sekvens matrice. Der vil indgå samme regler og matematiske metoder, som ved transformering af impedans matricen [2.30]. Transformeringen kan skrives i matrix form.

$$[Y^{+-0}] = [T]^{-1} [Y^{abc}] [T] \quad (2.52)$$

Værdien der aflæses i $[Y^{+-0}]$ er positiv sekvens admittans for en længde på en meter af linjen.

$$Y^+ = (j3.571) \cdot 10^{-9} \quad [S/m] \quad (2.53)$$

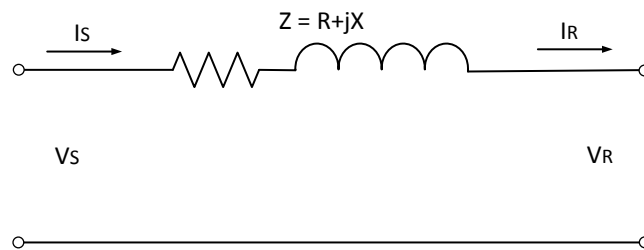
2.3 Spændingsfald ved PI-model

Dette afsnit har til formål at beregne spændingsfald på linjen. Til beregningen anvendes en PI-model. Der findes i alt tre PI-modeller. En kort, en mellem og en lang

model. Afsnittet vil afgrænse sig til at beskrive den korte PI-model og den mellemste PI-model. Den lange PI-model anvendes på transmissions linjer med en længde større end 250 km. I Danmark opnår transmission linjer ikke denne længde. Derfor vil den lange model ikke være aktuel til beregninger på linjen mellem Idomlund og Tjele.

2.3.1 Kort PI model

Den korte PI model anvendes ved linjer hvor $l < 80\text{km}$ [Saadat, 2010], eller hvor spændingen $V < 69\text{kV}$. I den korte model indgår kun serie impedans. Kapacitansen på denne korte strækning er meget lille og har derfor ikke en nævneværdig indflydelse. Den bliver derfor negligeret ved beregningen af spændingsfald på linjen. Den korte PI model er tegnet ved et ækvivalent diagram på figur [2.7]. Ved at benytte



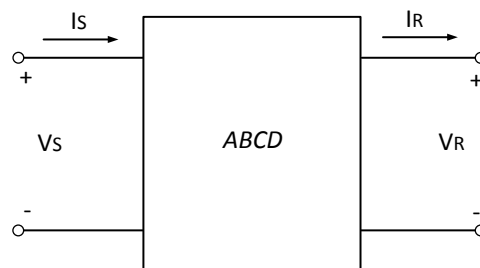
Figur 2.7. Figuren viser ækvivalent diagram af en kort PI model.

KVL og KCL kan ligninger skrives op for spændinger og strømme i kredsløbet. Ligningerne for kredsløbet med en belastning på (R_L), bliver som følgende.

$$V_S = V_R + Z \cdot I_R \quad [V] \quad (2.54)$$

$$I_S = I_R \quad [A] \quad (2.55)$$

Ved beregning kan linjen præsenteres med et to-ports netværk. Ud fra denne skrives



Figur 2.8. Figuren viser et to port netværk for PI- model.

ligningerne op ved kredsløbskonstanterne kendt som $ABCD$. For netværket gælder følgende ligninger.

$$V_S = AV_R + BI_R \quad [V] \quad (2.56)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad [A] \quad (2.57)$$

Ved at sammenligne ligning [2.56] og [2.57] med ligning [2.54] og [2.55] kan kredsløbskonstanterne udledes.

$$A = 1 \quad B = Z \quad C = 0 \quad D = 1$$

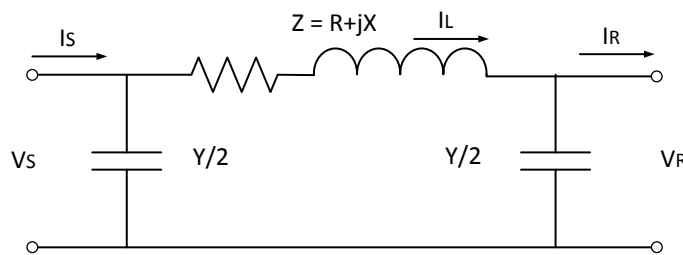
Ligningerne kan skrives op i matrix form.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Denne ligning anvendes ved beregning af værdierne for sende siden, når værdierne for modtage siden og systemkoefficienterne kendes.

2.3.2 Mellem PI model

Den anden model kaldes for mellem PI-model. Den anvendes ved linjer hvor $80 \text{ km} < l < 250 \text{ km}$, eller spændingen er større end 69 kV . I ækvivalent diagram for denne mellem model placeres den halve shunt admittans i begge ender af linjen. Igen placeres serie impedans på linjen, mellem forsynings siden og modtager siden. Ækvivalent diagram for mellem PI model er vist i figur [2.9]. Ved at anvende KCL



Figur 2.9. Tegningen viser et ækvivalent diagram af en mellem PI-model. Spændinger og strømme er indtegnet.

kan ligningen for strømmen i serie impedansen I_L opskrives.

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2} V_R \quad (2.59)$$

Ved at anvende KVL kan ligning for indgangs spændingen opskrives.

$$V_S = V_R + Z I_L \quad (2.60)$$

Ved substitution for I_L med ligning [2.59] fremkommer.

$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_R + Z I_R \quad (2.61)$$

Ligning for indgangs strømmen bliver.

$$I_S = I_L + \frac{Y}{2} V_S \quad (2.62)$$

Ved substitution for I_L [2.59] og V_s [2.60] fremkommer.

$$I_S = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) I_R \quad (2.63)$$

Koefficienterne $ABCD$ er nu defineret ved følgende

$$A = \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) \quad B = Z \quad (2.64)$$

$$C = \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) \quad D = \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) \quad (2.65)$$

Ved beregning gør sig gældende at serie impedans og shunt admittans er for linjens totale længde (l).

$$Z = (r + j\omega L)l \quad [\Omega] \quad (2.66)$$

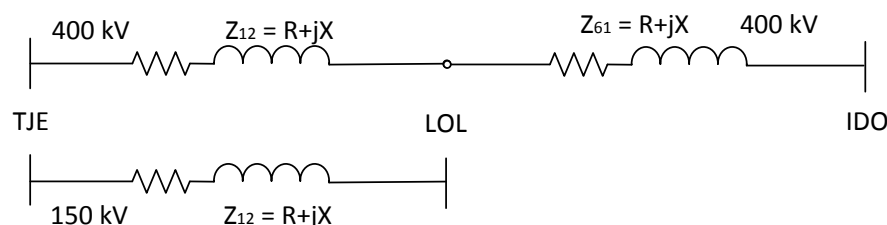
$$Y = (j\omega C)l \quad [\Omega] \quad (2.67)$$

Skal værdien for modtage siden beregnes, omskrives ligning [2.58] ved regnereglen for matricer.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

2.3.3 Spændingsfald og tab på linjen fra Idomlund til Tjele

Linjen er nu analyseret ved at udlede serie impedans [2.50] og shunt admittans [2.53]. Først kigges der på de 12 km. mellem Tjele og Loldrup. Der efter 61 km. mellem Loldrup og Idomlund. På figuren er vist et enstregs diagram for hele linjen. Figuren [2.10] viser 150 kV og 400 kV der er ført parallelt 12 km. Og 400 kV linjen alene 61 km. Det er kun spændingsfald på 400 kV linjen der ønskes værdier på. Derfor vil der ikke blive udført spændingsfalds beregning for 150 kV linjen.



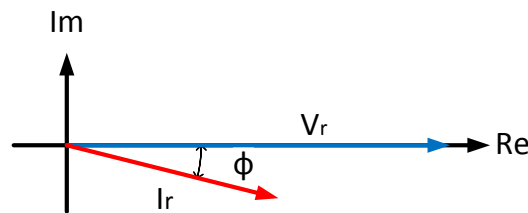
Figur 2.10. Figuren viser en ækvivalent enstregs tegning, med 150 kV linjen og 400 kV linjen.

Spændingsfald mellem Tjele og Loldrup 12 km

Ved beregningerne antages at Tjele er modtager ende på linjen. Linjens maksimale belastnings strøm vil være på 1380 A. Værdien på strømmen er udledt ved hjælp af oplysninger fra Energinet.dk's hjemmeside [Energinet.dk, 2013]. Her er oplyst en fasestrøm på 2760 A. Denne strøm er fordelt på to linjer med to parallelle leder for hver fase. Der antages at løbe den halve strøm pr. fase i hvert system. Dette er ikke den helt korrekte værdi. Når faselederne ligger tæt på hinanden, som de gør ved to parallelle, vil varmen fra lederne påvirke lederen ved siden af. Varmepåvirkning bliver negligeret ved denne udledning. Der antages en $pf = \phi = 0,95$ som lagger. Det betyder at strøm vektoren er efter spændings vektoren. Figuren [2.11] viser denne faseforskydningen mellem spændingen og strømmen. Forskydningen af strømmen regnes om til vinklen i grader.

$$I_{r_f} = I \angle \cos^{-1}(-\phi) = 1380 \angle -18,19^\circ \quad [A] \quad (2.69)$$

Forskydningen mellem spænding og strøm kan illustreres ved et vektordiagram. Her ligger spændingsvektoren ud af real akse og strømvektoren ligger forskudt med den negative vinkel $[\phi]$. Ved anvendelse af PI-model er det fasespænding $[V_f]$ der



Figur 2.11. Figuren viser et vektor diagram for, hvor strømvektoren I_r lagges spændingsvektoren V_r med vinklen ϕ .

anvendes. Den er faktoren $[\sqrt{3}]$ mindre end fase-fase spændingen $[V_{LL}]$.

$$V_{r_f} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 230,94 \quad [kV] \quad (2.70)$$

Med disse værdier kan der nu udregnes den spænding som der skal pålægges sende enden for at kunne opretholde fasespændingens værdi ved maksimal belastning. Fasespænding og fasestrøm, for de første 12 km sættes ind i en mellem PI model, sammen med de udregnede værdier for serie impedans og shunt admittans [app:matlab]³. Der vælges at anvende mellem PI-model, da spændingen $400 \text{ kV} > 69 \text{ kV}$ [Saadat, 2010].

$$\begin{bmatrix} V_{S(LOL)} \\ I_{S(LOL)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{r(TJE)} \\ I_{r(TJE)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (232767 + j4495) V \\ (1311 - j420) A \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

³Fixme Fatal: reference

Værdierne skrives om til polær form:

$$\begin{bmatrix} V_{S(LOL)} \\ I_{S(LOL)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (232,8 \angle 1,1^\circ) \text{ kV} \\ (1377 \angle -17,8^\circ) \text{ A} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

Hvor:

$$V_{S(LOL)} = \text{Spændingen for sende enden i Loldrup} \quad (2.73)$$

$$I_{S(LOL)} = \text{Strømmen i i sende enden i Loldrup} \quad (2.74)$$

$$V_{r(TJE)} = \text{Spændingen for modtager ende i Tjele} \quad (2.75)$$

$$I_{r(TJE)} = \text{Strømmen i belastningen i Tjele} \quad (2.76)$$

Ved beregning af spændingsfaldet $[V_\Delta]$ skal der konverteres til fase-fase spænding med en faktor $[\sqrt{3}]$ [2.70]. Det betyder at spændingsfaldet $[V_\Delta]$ på linjen mellem Loldrup og Tjele er bliver som følgende.

$$V_\Delta = (|V_{S(LOL)}| - |V_{r(TJE)}|) \cdot \sqrt{3} = 3,3 \text{ [kV]} \quad (2.77)$$

Linjen fortsætter til Idomlund, hvor den ikke bliver påvirket af andre transmissionslinjer. Værdierne kan derfor føres videre til beregningen på strækningen fra Idomlund til Loldrup.

Spændingsfald mellem Loldrup og Idomlund 61 km.

For linjen mellem Idomlund og Loldrup beregnes spændingsfaldet på en længde af 61 km. Værdierne fra beregning af serie impedans og shunt admittans på strækningen sættes ind i en mellem PI model. Spændingen $[V_{S(LOL)}]$ og strømmen $[I_{S(LOL)}]$ fra den forrige beregning på 12 km. [2.72] sættes ind som modtager værdierne $[V_R]$ og $[I_R]$. Der benyttes ligning [2.68].

$$\begin{bmatrix} V_{S(IDU)} \\ I_{S(IDU)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 230,94 \\ 1380 \angle -18,19^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 242118,83 + j29400,37 \text{ [kV]} \\ 1307,21 - j368,62 \text{ [A]} \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

Værdien omskrives til polær form.

$$\begin{bmatrix} V_{S(IDU)} \\ I_{S(IDU)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 243,9 \angle 6,92^\circ \text{ [kV]} \\ 1358,2 \angle -15,75^\circ \text{ [A]} \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

Det totale spændingsfald for linjen ved en belastning på 1380 A og en $pf = 0,95$ beregnes.

$$V_{\Delta LL} = 242118 - 230940 \cdot \sqrt{3} = 19,36 \text{ [kV]} \quad (2.80)$$

Den totale regulerings procent for spændingsfald $[V_{R_{total}}]$ på hele linjen beregnes.

$$V_{R_{total}} = \left(\frac{242118 - 230940}{230940} \right) \cdot 100 = 4,8\% \quad (2.81)$$

Den nominelle effekt der sendes ind i nettet beregnes til:

$$S_{S(3f)} = 3 \cdot V_{S(IDU)} \cdot I_{S(LOL)}^* \quad (2.82)$$

$$= 3 \cdot (242118,83 + j29400,37) \cdot (1307,21 + j368,62) \quad (2.83)$$

$$= (957,12 \angle 22,67^\circ) \text{ MVA} \quad (2.84)$$

Nominel effekt på load med 1380 A.

$$S_{Load_{3f}} = 3 \cdot V_r \cdot I_r^* = \angle 18,19 = 3 \cdot (230940 \cdot 1380 \angle 18,19) = 956,09 \angle 18,19 \text{ MVA} \quad (2.85)$$

Tabet på linjen kan nu beregnes ved:

$$S_{Line_{3f}} = S_{S_{3f}} - S_{load_{3f}} = 1,03 \angle 4,48^\circ \text{ MVA} \quad (2.86)$$

Udbygget 400 kV forbindelse Idomlund - Tjele 3

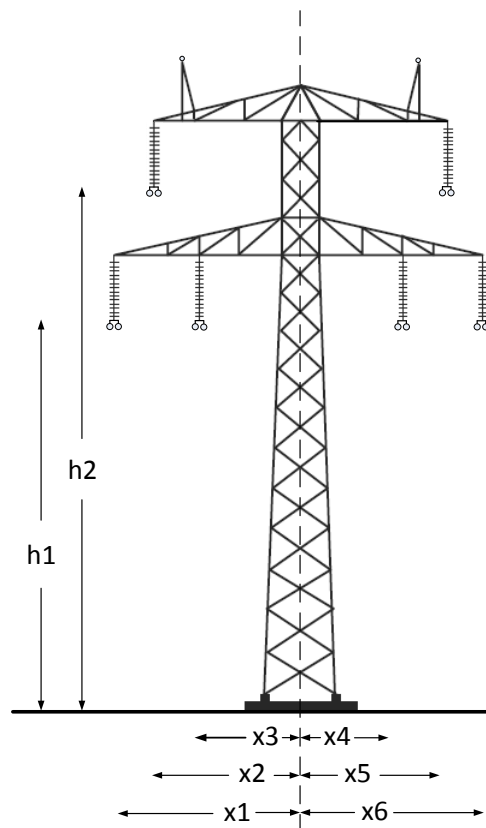
I dette kapitel vil der blive beregnet serie impedans og shunt admittans på den udbyggede 400 kV linje mellem Idomlund og Tjele. Linjen er 73 km. lang. Der er placeret to parallelle 400 kV linjer i masten. Hver linje er af typen "Martin Duplex". Det vil sige der er to leder bundtet for hver fase i hvert system. Faselederne er placeret triangulært på hver sin side af masten, med en fase for hvert system på den øverste travers. Og to faser for hvert system på den nederste travers. De tre faser på hvert system, er asymmetrisk placeret. Dette vil fremgå af figuren, med fasernes placering i Donaumasten. Faserne på højre side vil kunne ses som en spejling af venstre side, betragtet fra en centerlinje lodret ned gennem masten. Systemets serie impedans og shunt admittans vil blive udledt. De oplyste kabeldata er indsat i tabellen [3.1].

	400 kV	Jordtråd
Type:	<i>Martin</i>	<i>Dorking</i>
Konfiguration:	<i>Duplex</i>	<i>Single</i>
Tværsnit areal:	$772,06 \text{ mm}^2$	$152,80 \text{ mm}^2$
Materiale:	<i>ACSR</i>	<i>ACSR</i>
Duplex afstand:	$0,4 \text{ m}$	–
Diameter:	$36,17 \text{ mm}$	$16,01 \text{ mm}$
Resistans:	$0,0212 \text{ } \Omega/\text{km}$	$0,0277 \text{ } \Omega/\text{km}$

Table 3.1. Data for systemet og de anvendte leder. Data er slået op i datablad[OMAN, 2016].

3.0.1 Serie impedans

For beregning af serie impedans på linjen udledes distancer mellem faselederne. Der er indsat tegning af masten med målangivelse for faseplacering. Hvor x-målene er vandrette mål og h-mål er værdier højde. Distancerne mellem faselederne sættes ind i tabel [3.2]. Alle distancer mellem faseleder sættes ind i tabel [3.3]. Der anvendes ækvivalent faserradius [D_s^b] [2.22]. Denne er regnet ved ligning [2.16].



Figur 3.1. Figuren viser Donau masten for den nye 400 kV mellem Idomlund og Tjele

Horisontale mål		Vertikale mål	
x1	12,92 m	h1	25,00 m
x2	10,37 m	h2	33,80 m
x3	7,17 m	—	—
x4	7,17 m	—	—
x5	10,37 m	—	—
x6	12,92 m	—	—

Tabel 3.2. X-målene er vandret med udgangspunkt fra mastecenter. Værdien for h er højde fra jordoverflade til leder i mast.

	A	B	C	a	b	c
A	0,075	9,16	5,75	25,84	24,90	20,09
B	9,16	0,075	9,36	19,62	14,64	24,90
C	5,75	9,36	0,075	14,34	19,62	14,34
A1	25,84	24,90	20,09	0,075	9,16	5,75
B1	23,29	20,74	19,62	9,16	0,075	9,36
C1	20,09	19,62	14,34	5,75	9,36	0,075

Tabel 3.3. Tabel over distancer mellem lederne ophængt i masten. Diagonalen er værdier for to parallelle leders GMR.

Ligningerne for impedans udledes efter samme normer som i afsnit [2.1.1], og sættes ind i matricen [3.2]. Matricen deles op fire delmatricer.

$$\left[\begin{array}{c|c} Z1^{abc} & Z2^{abc} \\ \hline Z3^{abc} & Z4^{abc} \end{array} \right] \quad (3.1)$$

De fire delmatricer er vist med værdierne indsat.

$$[Z1^{abc}] = \begin{bmatrix} 7.02e-5 + j5.92e-4 & 4.93e-5 + j2.9e-4 & 4.93e-5 + j3.2e-4 \\ 4.93e-5 + j2.9e-4 & 7.02e-5 + j5.92e-4 & 4.93e-5 + j2.89e-4i \\ 4.93e-5 + j3.2e-4 & 4.93e-5 + j2.89e-4 & 7.02e-5 + j5.92e-4i \end{bmatrix} [\Omega] \quad (3.2)$$

$$[Z2^{abc}] = \begin{bmatrix} 4.93e-5 + j2.25e-4 & 4.93e-5 + j2.28e-4 & 4.93e-5 + 2.41e-45 \\ 4.93e-5 + j2.43e-4 & 4.93e-5 + j2.62e-4 & 4.93e-5 + j2.62e-4 \\ 4.93e-5 + j2.62e-4 & 4.93e-5 + j2.43e-4 & 1.48e-4 + j7.29e-4 \end{bmatrix} [\Omega]$$

$$[Z3^{abc}] = \begin{bmatrix} 4.93e-5 + j2.25e-4 & 4.93e-5 + j2.28e-4 & 4.93e-5 + j2.41e-4 \\ 4.93e-5 + j2.32e-4i & 4.93e-5 + j2.39e-4 & 4.93e-5 + j2.43e-4 \\ 4.93e-5 + j2.41e-4 & 4.93e-5 + j2.43e-4 & 4.93e-5 + j2.62e-4 \end{bmatrix} [\Omega]$$

$$[Z4^{abc}] = \begin{bmatrix} 7.02e-5 + j5.92e-4 & 4.93e-5 + j2.9e-4 & 4.93e-5 + j3.2e-4 \\ 4.93e-5 + j2.9e-4 & 7.02e-5 + j5.92e-4 & 4.93e-5 + j2.89e-4 \\ 4.93e-5 + j3.2e-4 & 4.93e-5 + j2.89e-4 & 7.02e-5 + j5.92e-4 \end{bmatrix} [\Omega]$$

Impedans matricen transformeres til sekvens matrice. Der vil indgå samme regler som ved transformering af matricen [2.31].

$$[Z^{+-0}] = [T]^{-1} [Z] [T] \quad [\Omega] \quad (3.3)$$

Matricen deles op i fire delmatricer efter samme princip som i [3.4] De fire delmatricer er vist med værdierne indsat.

$$[Z1^{+-0}] = \begin{bmatrix} 2.08e-5 + j2.93e-4 & 1.69e-5 - j1.07e-5 & 8.45e-6 + j5.33e-6 \\ -1.69e-5 - j1.07e-5 & 2.08e-5 + j2.93e-4 & -8.45e-6 + j5.33e-6 \\ -8.45e-6 + j5.33e-6 & 8.45e-6 + j5.33e-6 & 1.69e-4 + j0.00119 \end{bmatrix} [\Omega] \quad (3.4)$$

$$[Z2^{+-0}] = \begin{bmatrix} -2.52e-6 + j9.32e-6 & 9.58e-6 - j1.79e-5 & 1.0e-5 - j1.86e-5 \\ -9.58e-6 - j1.79e-5 & 2.52e-6 + j9.32e-6 & -1.0e-5 - j1.86e-5 \\ 4.26e-7 - j5.33e-7 & -4.26e-7 - j5.33e-7 & 1.48e-4 + j7.31e-4 \end{bmatrix} [\Omega]$$

$$[Z3^{+-0}] = \begin{bmatrix} -1.21e-6 + j4.43e-6 & -1.21e-7 - j3.69e-6 & 9.37e-6 - j1.19e-5 \\ 1.21e-7 - j3.69e-6 & 1.21e-6 + j4.43e-6 & -9.37e-6 - j1.19e-5 \\ -1.06e-5 - j9.81e-6 & 1.06e-5 - j9.81e-6 & 1.48e-4 + j7.18e-4 \end{bmatrix} [\Omega]$$

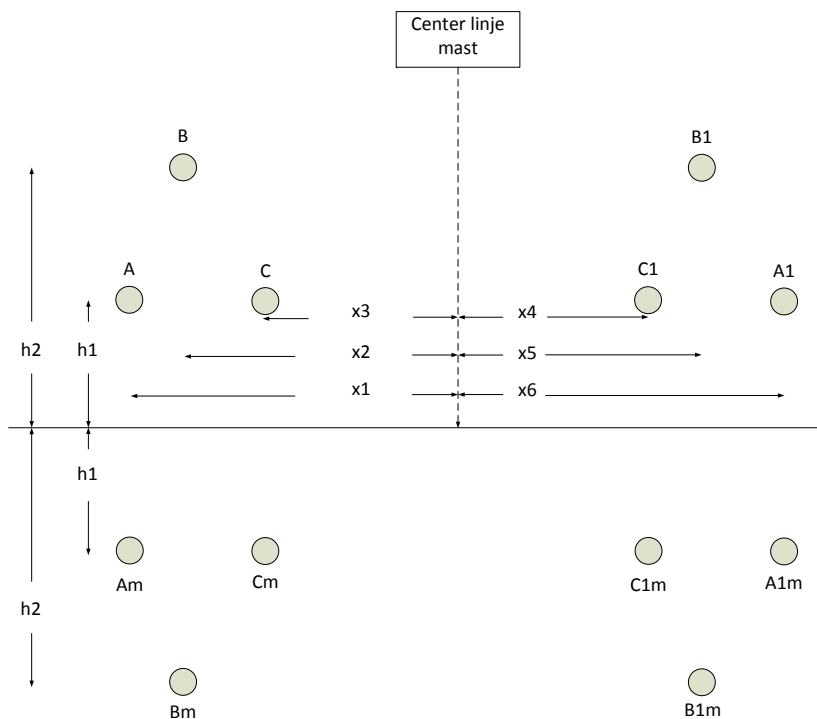
$$[Z_{4^{+-0}}] = \begin{bmatrix} 2.08e-5 + j2.93e-4 & 1.69e-5 - j1.07e-5 & 8.45e-6 + j5.33e-6 \\ 1.69e-5 - j1.07e-5 & 2.08e-5 + j2.93e-4 & -8.45e-6 + j5.33e-6 \\ -8.45e-6 + j5.33e-6 & 8.45e-6 + j5.33e-6 & 1.69e-4 + j0.00119 \end{bmatrix} [\Omega]$$

Værdien for positiv sekvens aflæst i $Z_{1(1,1)}^{+-0}$ er serie impedans i $[\Omega/m]$.

$$Z^+ = (2,09 + j29,26i) \cdot 10^{-5} \quad [\Omega/m] \quad (3.5)$$

3.0.2 Shunt admittans

For beregning af shunt admittans for linjen mellem Idomlund og Tjele, vil distancerne mellem både lederne og spejlingspunkter i jorden anvendes. Figuren [3.2] viser ækvivalent tegning af fasernes og spejlingspunktets placering. Distancerne mellem faseleder og spejlingspunkter er sat ind i tabel [3.4] og [3.5].



Figur 3.2. Figuren er en ækvivalent tegning af ledernes placering, med spejling i jorden. Notationen "m" indikerer spejling "mirror".

Distance mellem luftleder						
	A	B	C	A1	B1	C1
A	0,075	9,16	5,75	20,09	24,90	25,84
B	9,16	0,075	9,36	19,62	20,74	24,90
C	5,75	9,36	0,075	14,34	19,62	20,09
A1	20,09	19,62	14,34	0,075	9,36	5,75
B1	24,90	20,74	19,62	9,16	0,075	9,16
C1	25,84	24,90	20,09	5,75	9,16	0,075

Tabel 3.4. Tabel indeholder distancer mellem faseleder

Distance mellem fase og ækvivalent						
	Am	Bm	Cm	A1m	B1m	C1m
A	39,33	48,20	39,75	44,17	53,47	47,06
B	48,20	56,93	48,24	51,23	60,59	53,47
C	39,75	48,24	39,33	41,87	51,23	44,17
A1	44,17	51,23	41,87	39,33	48,24	39,75
B1	53,47	60,59	51,23	48,24	56,93	48,20
C1	47,06	53,47	44,17	39,75	48,20	39,33

Tabel 3.5. Tabel indeholder distancer mellem faseleder og spejling i jorden

Alle ligninger for potentiale udledes, efter samme metode som i afsnit [2.1.2] og sættes ind i matrix [3.6]. Matricen deles op i fire delmatricer efter samme princip som i [3.2]. De fire delmatricer er vist med værdierne indsat.

$$[Y1^{abc}] = \begin{bmatrix} j3.22e - 9 & -j5.64e - 10 & -j7.99e - 10 \\ -j5.64e - 10 & j2.99e - 9 & -j5.2e - 10 \\ -j7.99e - 10 & -j5.2e - 10 & j3.27e - 9 \end{bmatrix} [S] \quad (3.6)$$

$$[Y2^{abc}] = \begin{bmatrix} -j1.31e - 10 & -j1.15e - 10 & -j6.82e - 11 \\ -j1.93e - 10 & -j2.66e - 10 & -j1.15e - 10 \\ -j2.88e - 10 & -j1.93e - 10 & -j1.31e - 10 \end{bmatrix} [S]$$

$$[Y3^{abc}] = \begin{bmatrix} -j1.31e - 10 & -j1.93e - 10 & -j2.88e - 10 \\ -j1.15e - 10 & -j2.66e - 10 & -j1.93e - 10 \\ -j6.82e - 11 & -j1.15e - 10 & -j1.31e - 10 \end{bmatrix} [S]$$

$$[Y4^{abc}] = \begin{bmatrix} j3.27e - 9 & -j5.2e - 10 & -j7.99e - 10 \\ -j5.2e - 10 & j2.99e - 9 & -j5.64e - 10 \\ -j7.99e - 10 & -j5.64e - 10 & j3.22e - 9 \end{bmatrix} [S]$$

Admittans matricen transformeres til sekvens matricer. Der vil indgå samme regler som ved transformering af matricen [2.30].

$$[Y^{+-0}] = [T]^{-1} [Y] [T] \quad [S] \quad (3.7)$$

De fire delmatricer er vist med værdierne indsat.

$$[Y1^{+-0}] = \begin{bmatrix} j3.79e-9 & j1.39e-10 & -j2.22e-11 \\ j1.39e-10 & j3.79e-9 & -j2.22e-11 \\ -j2.22e-11 & -j2.22e-11 & j1.9e-9 \end{bmatrix} [S] \quad (3.8)$$

$$[Y2^{+-0}] = \begin{bmatrix} -j1.42e-11 & j3.06e-11 & j9.28e-11 \\ j3.06e-11 & -j1.42e-11 & j9.28e-11 \\ -j5.58e-11 & -j5.58e-11 & -j5.0e-10 \end{bmatrix} [S]$$

$$[Y3^{+-0}] = \begin{bmatrix} -j1.42e-11 & j3.06e-11 & -j5.58e-11 \\ j3.06e-11 & -j1.42e-11 & -j5.58e-11 \\ j9.28e-11 & j9.28e-11 & -j5.0e-10 \end{bmatrix} [S]$$

$$[Y4^{+-0}] = \begin{bmatrix} j3.79e-9 & j1.18e-10 & j2.23e-11 \\ j1.18e-10 & j3.79e-9 & j2.23e-11 \\ j2.23e-11 & j2.64e-11 & j1.9e-9 \end{bmatrix} [S]$$

Værdien der aflæses i Y^+ er positiv sekvens for linjen i S/m .

$$Y^+ = (j3, 79) \cdot 10^{-9} S/m \quad (3.9)$$

3.0.3 Beregning af spændingsfald på den nye linje mellem Idomlund og Tjele

Til beregning af spændingsfald på linjen anvendes mellem PI model [Saadat, 2010]. Ved at buge PI-modellen kan spændingen udregnes for sende enden Idomlund. Spændingen og strømmen i modtager enden er samme værdi som fra [2.3.3]. Der er nu to parallelle linjer. Der antages at systemet er balanceret og derfor vil strømmen i de to systemer have samme værdi. Den opgivte værdi på 2760 A [Energinet.dk, 2013] kan deles i to. Derfor vil fasestrømmen, der løber i belastningen, for hver linje være.

$$I_f = \frac{2760}{2} = 1380 \quad [A] \quad (3.10)$$

Spændingen der skal anvendes i PI-model er en fasespænding $[V_f]$ ved modtager enden .

$$V_f = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = 230,94 \quad [kV] \quad (3.11)$$

Der antages en power faktor $[pf]$ på 0,95, der lagges.

Serie impedans og shunt admittans fra [3.5] og [3.9] sættes ind i systemkoefficienterne. Resultatet bliver følgende.

$$\begin{bmatrix} V_{S(IDU)} \\ I_{S(IDU)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{r(TJE)} \\ I_{r(TJE)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (241456,98 + j27393,30) V \\ (1307,21 - j365,60) A \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Værdierne omskrives til polær form.

$$\begin{bmatrix} V_{S(IDU)} \\ I_{S(IDU)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (243 \angle 6,47^\circ) \text{ kV} \\ (1357,38 \angle -15,63^\circ) \text{ A} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Det totale spændingsfald $[V_\delta]$ beregnes for linjen ved en belastning på 1380 A og en antaget power faktor $[pf = 0,95]$. Det gøres med følgende.

$$V_{\Delta LL} = (243 - 230,94) \cdot \sqrt{3} = 20,9 \quad [\text{kV}] \quad (3.14)$$

Den totale regulerings procent for spændingsfald $[VR]$ på hele linjen beregnes.

$$VR_{total} = \left(\frac{243 - 230,94}{230,94} \right) \cdot 100 = 5,2\% \quad (3.15)$$

Den nominelle effekt der sendes ind i nettet beregnes. De udførte beregninger er for en linje. Det antages derfor der kan ganges med en faktor [2] både for lasten og linjetabet. [2.85].

$$S_{S3f_{dobbelt}} = 2 \cdot 3 \cdot V_{S(IDU)} \cdot I_{S(IDU)}^* \quad (3.16)$$

$$= 6 \cdot (241456,98 + j27393,30) \cdot (1311,0 + j430,90) \quad (3.17)$$

$$= (2012 \angle 24,67^\circ) \quad [\text{MVA}] \quad (3.18)$$

Den nominelle effekt på belastningen kendes fra forrige beregning, under det nuværende system [2.85].

$$S_{Load3f_{dobbelt}} = 2 \cdot (956,09 \angle 18,19^\circ) = (1912,18 \angle 18,19^\circ) \quad [\text{MVA}] \quad (3.19)$$

Her efter anvendes ligning [2.86] til beregningen af effekten på de to parallelle linjer.

$$S_{Line3f_{dobbelt}} = (S_{S3f_{dobbelt}} - S_{load3f_{dobbelt}}) = 99,82 \angle 6,48^\circ \text{ MVA} \quad (3.20)$$

Konklusion 4

Efter udledningen af seri impedans og shunt admittans på det eksisterend system og den udbyggede linje med to parallelle linjer. Der kan det konkluderes Shunt admittansen bliver en lidt større værdi i et system med parallelle linjer. I tabellen kan det ses at værdien for shunt admittansen er er lidt større for linjen med kombinationen af 150 kV og 400 kV. Ud fra beregningerne er shunt admittansen

System	Z	Y	V_{Δ}
400 kV 150 kV	$(2,11+j29,3) \cdot 10^{-5}$	$j3,79 \cdot 10^{-9}$	4,8 %
400 kV 400 kV	$(2,09+j29,26) \cdot 10^{-5}$	$j3,79 \cdot 10^{-9}$	5,2 %
400 kV	$(2,12+j31,80) \cdot 10^{-5}$	$j3,57 \cdot 10^{-9}$	-

Tabel 4.1. Tabellen indeholder beregnede data på to parallelle system og et system med enkelt linje

ca. 6 % større ved parallelle linjer. Det ka desuden konkluderes at imaginær delen af serie impedansen er lidt mindre end linjen med en 400 kV. Her er reaktansen ca. 8 % større den single 400 kV linje. Det ka konkluderes at spændingsfaldet opgjort i procent tiltager med med en stigende spænding.

Alle beregninger er udfært uden at tage konsekvensen fra jordlederen med. Derfor kan der ikke konkluderes på hvordan jordlederen påvirker systemets serie impedans og shunt admittans. Konklusionen på projektet er at det ville give et mere klart billede af hvordan fluxkoblingen påvirker system, hvis jordlederens påvirkning er med i beregningerne.

Litteratur

- Bergen og Vittal, 2006.** Arthur R. Bergen og Vijay Vittal. *Power System Analysis*. ISBN: 978-81-7758-819-4, Handbook. Pearson Education, 2006.
- Energinet.dk, 2013.** Energinet.dk. *Ny 400 kV-luftledning mellem Idomlun og Tjele*. https://www.anlaegsrapport.dk/2013_2014/eltransmission/Sider/Ny-400-kV-luftledning-mellem-Idomlund-og-Tjele.aspx, 2013.
Downloadet: 23-07-2016.
- Jewett og Serway, 2010.** John W. Jewett og Jr. Raymond A. Serway. *Physics for scientists and engineers with modern physics*. ISBN: 978-1-4390-4875-7, Handbook. Mary Finch, 2010.
- OMAN, 2016.** OMAN. *Overhead Line Conductors*.
http://www.omancables.com/brochure/Overhead_Line_Conductor.pdf,
2016. Downloadet: 29-08-2016.
- Saadat, 2010.** Hadi Saadat. *Power System Analysis*. ISBN: 978-0-9845438-0-9, Handbook. PSA Publishing, 2010.
- Silva, 2015.** Filipe Miquel Faria Da Silva. *Line parameters and line models*.
Lektion 2 AAU, Power Systems, 2015.

Rettelser

Fatal: Der mangler reference	3
Fatal: kilde	11
Fatal: referense	22

Beregninger på eksisterende system 12km. Print af matlab script



textbf12 km mellem Loldrup og Tjele

```
clc
clear all
close all

%%% 150 kV Tjele-Loldrup  %%%
%%% Conductor Data %%%
%%% Martin  %%%
%%% Beregning af flux koblingen fra 150 Kv %%%

f = 50; % Frekvens 50 Hz
omega = 2*pi*f; %
Di = 36.17*10^-3; % Conductor diameter i meter.
r = Di/2; % Conductor radius i meter.
d = 0.40; % Bundle distance i meter
D_s = r*0.7788; % exp(-1/4)*r_c;
D_sb = (D_s*d)^(1/2); %
R = 0.0423; % Leder resistans
my_0 = 4*pi*10^-7; % H/m Henry pr. meter.
k1 = (my_0/(2*pi)); % Resultat er mH/km, miliHenry pr. km. Gnaget med 10^6
Iso_1 = 4.00; % Længde på isolatorkæde 400 kV i meter
Iso_2 = 1.70;
rho_j = 100; % Resitivitet for jord

ri = 0.0417e-3/2; % konverteret til Ohmsk modstand i leder på km. med *10^-3
ri_1 = 0.0423e-3; % Faseleders resistans
ri_2 = 0.0423e-3/2; % Konverteret til Ohmsk modstand i leder på km. med *10^-3 ved to parallelle tråde
rd = 9.869e-7*f; %
De = 658.368*sqrt(rho_j/f); % Angivet i meter, Skal være samme enhed som distance mellem faser

%%% Målsætning for beregning af indbyrdes afstande
X1 = 12.92; % i meter
X2 = 10.37; % Afrundet fra 10.37
X3 = 7.17; % Rundet op fra 12.92
X4 = 4.05;
X5 = 7.60;
X6 = 10.37;

Pilh_1 = 29.00;
```

```

Pilh_2 = 37.80;

Y1 = Pilh_1-Iso_1;
Y2 = Pilh_2-Iso_1;
Y3 = Pilh_2-Iso_2;

%%% Distanse fra Conductor A til de andre %%%
DAA = D_sb;
DAB = sqrt((X1-X2)^2+(Y2-Y1)^2);
DAC = X1-X3;
DAa = sqrt((X1+X4)^2+(Y3-Y1)^2);
DAb = sqrt((X1+X5)^2+(Y3-Y1)^2);
DAc = sqrt((X1+X6)^2+(Y3-Y1)^2);

%%% Conductor B %%%
DBA = sqrt((X1-X2)^2+(Y2-Y1)^2);
DBB = D_sb;
DBC = sqrt((X2-X3)^2+(Y2-Y1)^2);
DBa = sqrt((X2+X4)^2+(Y3-Y2)^2);
DBb = sqrt((X2+X5)^2+(Y3-Y2)^2);
DBc = sqrt((X2+X6)^2+(Y3-Y2)^2);

%%% Conductor C %%%
DCA = X1-X3;
DCB = sqrt((X2-X3)^2+(Y2-Y1)^2);
DCC = D_sb;
DCa = sqrt((X3+X4)^2+(Y3-Y1)^2);
DCb = sqrt((X3+X5)^2+(Y3-Y1)^2);
DCc = sqrt((X3+X6)^2+(Y3-Y1)^2);

% %%% Conductor A1 %%%
DaA = sqrt((X1+X4)^2+(Y3-Y1)^2);
DaB = sqrt((X2+X4)^2+(Y3-Y2)^2);
DaC = sqrt((X3+X4)^2+(Y3-Y1)^2);
Daa = D_s;
Dab = X5-X4;
Dac = X6-X4;

% %%% Conductor B1 %%%
DbA = sqrt((X1+X5)^2+(Y3-Y1)^2);
DbB = sqrt((X2+X5)^2+(Y3-Y2)^2);
DbC = sqrt((X3+X5)^2+(Y3-Y1)^2);
Dba = Dab;
Dbb = D_s;
Dbc = X6-X5;

%
% %%% Conductor C1 %%%
DcA = sqrt((X1+X6)^2+(Y3-Y1)^2);
DcB = sqrt((X2+X6)^2+(Y3-Y2)^2);
DcC = sqrt((X3+X6)^2+(Y3-Y1)^2);
Dca = X6-X4;
Dcb = X6-X5;
Dcc = D_s;

%%% Matrix(L) er induktans matrix
L = [log(De/DAA)    log(De/DAB)    log(De/DAC)    log(De/DAa)    log(De/DAb)    log(De/DAc);
     log(De/DBA)    log(De/DBB)    log(De/DBC)    log(De/DBa)    log(De/DBb)    log(De/DBc);
     log(De/DCA)    log(De/DCB)    log(De/DCC)    log(De/DCa)    log(De/DCb)    log(De/DCc);
     log(De/DaA)    log(De/DaB)    log(De/DaC)    log(De/Daa)    log(De/Dab)    log(De/Dab);
     log(De/DbA)    log(De/DbB)    log(De/DbC)    log(De/DbA)    log(De/Dbb)    log(De/Dbc);
     log(De/DcA)    log(De/DcB)    log(De/DcC)    log(De/Dca)    log(De/Dcb)    log(De/Dcc)]

```



```

Xl= i*omega*k1*L    % Faktor til omregning fra induktans til impedans

%%% Matrixform af induktansen L %%%
%%% Matrix(Z) er linje impedans
Z = [ri_2+rd+Xl(1,1)  rd+Xl(1,2)  rd+Xl(1,3)  rd+Xl(1,4)  rd+Xl(1,5)  rd+Xl(1,6);
     rd+Xl(2,1)  ri_2+rd+Xl(2,2)  rd+Xl(2,3)  rd+Xl(2,4)  rd+Xl(2,5)  rd+Xl(2,6);
     rd+Xl(3,1)  rd+Xl(3,2)  ri_2+rd+Xl(3,3)  rd+Xl(3,4)  rd+Xl(3,5)  rd+Xl(3,6);
     rd+Xl(4,1)  rd+Xl(4,2)  rd+Xl(4,3)  ri_1+rd+Xl(4,4)  rd+Xl(4,5)  rd+Xl(4,6);
     rd+Xl(5,1)  rd+Xl(5,2)  rd+Xl(5,3)  rd+Xl(5,4)  ri_1+rd+Xl(5,5)  rd+Xl(5,6);
     rd+Xl(6,1)  rd+Xl(6,2)  rd+Xl(6,3)  rd+Xl(6,4)  rd+Xl(6,5)  ri_1+rd+Xl(6,6)];

%%% Transformation til symetriske sekvenser
syms a

a = -(1/2)+i*(sqrt(3)/2);    % Konvertering faktor a = 120 gr. og a^2 = 2240 gr.

T = [1 1 1;                % Transformations matrix til sequenserne 'pno'
     a^2 a 1;
     a a^2 1];            %

Tm = [1 1 1 0 0 0;        %Transformation matrix er sat ind 1 0
      a^2 a 1 0 0 0;      %
      a a^2 1 0 0 0;      %

      0 0 0 1 1 1;
      0 0 0 a^2 a 1;
      0 0 0 a a^2 1];

Z_pno = inv(Tm)*Z*Tm;    % Impedance i symetriske sekvenser

ResultZ = vpa(Z_pno(1),5)    % 3 betyden cifre.

%%
Sag = 8.00; % Middel nedhæng
Sag_avg = 8*(2/3);

h1 = Y1-Sag_avg;
h2 = Y2-Sag_avg;
h3 = Y3-Sag_avg;

%%% 2*1 leder bundet

D_sb = sqrt(D_s*d);

%%%
a11 = D_sb;
b11 = 2*h1;

a12 = sqrt((X1-X2)^2+(h2-h1)^2);
b12 = sqrt((X1-X2)^2+(h2+h1)^2);

a13 = X1-X3;
b13 = sqrt((X1-X3)^2+(2*h1)^2);

a14 = sqrt((X1+X4)^2+(h3-h1)^2);
b14 = sqrt((X1+X4)^2+(h3+h1)^2);

a15 = sqrt((X1+X5)^2+(h3-h1)^2);
b15 = sqrt((X1+X5)^2+(h3+h1)^2);

```

```

a16 = sqrt((X1+X6)^2+(h3-h1)^2);
b16 = sqrt((X1+X6)^2+(h3+h1)^2);

a21 = sqrt((X1-X2)^2+(h2-h1)^2);
b21 = sqrt((X1-X2)^2+(h1+h2)^2);

a22 = D_sb;
b22 = 2*h2;

a23 = sqrt((X2-X3)^2+(h2-h1)^2);
b23 = sqrt((X2-X3)^2+(h2+h1)^2);

a24 = sqrt((X3+X4)^2+(h3-h2)^2);
b24 = sqrt((X3+X4)^2+(h3+h2)^2);

a25 = sqrt((X3+X5)^2+(h3-h2)^2);
b25 = sqrt((X3+X5)^2+(h3+h2)^2);

a26 = sqrt((X3+X6)^2+(h3-h2)^2);
b26 = sqrt((X3+X6)^2+(h3+h2)^2);

a31 = X1-X3;
b31 = sqrt((X1-X3)^2+(2*h1)^2);

a32 = sqrt((X2-X3)^2+(h2-h1)^2);
b32 = sqrt((X2-X3)^2+(h2+h1)^2);

a33 = D_sb;
b33 = 2*h1;

a34 = sqrt((X3+X4)^2+(h3-h1)^2);
b34 = sqrt((X3+X4)^2+(h3+h1)^2);

a35 = sqrt((X3+X5)^2+(h3-h1)^2);
b35 = sqrt((X3+X5)^2+(h3+h1)^2);

a36 = sqrt((X3+X6)^2+(h3-h1)^2);
b36 = sqrt((X3+X6)^2+(h3+h1)^2);

a41 = sqrt((X4+X1)^2+(h3-h1)^2);
b41 = sqrt((X4+X1)^2+(h3+h1)^2);

a42 = sqrt((X4+X2)^2+(h3-h2)^2);
b42 = sqrt((X4+X2)^2+(h3+h2)^2);

a43 = sqrt((X4+X3)^2+(h3-h1)^2);
b43 = sqrt((X4+X3)^2+(h3+h1)^2);

a44 = r;
b44 = 2*h3;

a45 = X5-X4;
b45 = sqrt((X5-X4)^2+(2*h3)^2);

a46 = X6-X4;
b46 = sqrt((X6-X4)^2+(2*h3)^2);

a51 = sqrt((X5+X1)^2+(h3-h1)^2);
b51 = sqrt((X5+X1)^2+(h3+h1)^2);

a52 = sqrt((X5+X2)^2+(h3-h2)^2);
b52 = sqrt((X5+X2)^2+(h3+h2)^2);

```

```

a53 = sqrt((X5+X3)^2+(h3-h1)^2);
b53 = sqrt((X5+X3)^2+(h3+h1)^2);

a54 = X5-X4;
b54 = sqrt((X5-X4)^2+(2*h3)^2);

a55 = r;
b55 = 2*h3;

a56 = X6-X5;
b56 = sqrt((X6-X5)^2+(2*h3)^2);

a61 = sqrt((X6+X1)^2+(h3-h1)^2);
b61 = sqrt((X6+X1)^2+(h3+h1)^2);

a62 = sqrt((X6+X2)^2+(h3-h2)^2);
b62 = sqrt((X6+X2)^2+(h3+h2)^2);

a63 = sqrt((X6+X3)^2+(h3-h1)^2);
b63 = sqrt((X6+X3)^2+(h3+h1)^2);

a64 = X6-X4;
b64 = sqrt((X6-X4)^2+(2*h3)^2);

a65 = X6-X5;
b65 = sqrt((X6-X5)^2+(2*h3)^2);

a66 = r;
b66 = 2*h3;
%%%
% Eps_o er permitiviteten for luft

Eps_0 = 8.85*(10^(-12));

k =(2*pi*Eps_0)^-1;

%%%
P_abc =
k*[log(b11/a11) log(b12/a12) log(b13/a13) log(b14/a14) log(b15/a15) log(b16/a16);
   log(b21/a21) log(b22/a22) log(b23/a23) log(b24/a24) log(b25/a25) log(b26/a26);
   log(b31/a31) log(b32/a32) log(b33/a33) log(b34/a34) log(b35/a35) log(b36/a36);
   log(b41/a41) log(b42/a42) log(b43/a43) log(b44/a44) log(b45/a45) log(b46/a46);
   log(b51/a51) log(b52/a52) log(b53/a53) log(b54/a54) log(b55/a55) log(b56/a56);
   log(b61/a61) log(b62/a62) log(b63/a63) log(b64/a64) log(b65/a65) log(b66/a66)];

%%% fase conductor as coordinates %%%
C = inv(P_abc);

Y_abc = i*omega*C; %*12e3

syms a % Registrere en variabel i matlab

a = -(1/2)+i*(sqrt(3)/2); %

T = [1  1  1  0 0 0 ; %Transformation matrix
     a^2 a  1  0 0 0 ; %
     a  a^2 1  0 0 0;
     0 0 0  1 1 1;
     0 0 0  a^2 a 1;
     0 0 0  a a^2 1] ; %

```

```

    Y_pno = inv(T)*Y_abc*T ;
    Result_Y = imag(Y_pno(1))

%%
    lenght = 12e3;                % Længden på linjen i km
    Z_PI = (Z_pno(1))*lenght;     % Linje impedans for 61 km
    Y_PI = (imag(Y_pno(1)))*i*lenght; % Shunt admittans for 61 km
    A = 1+((Z_PI*Y_PI)/2);       % Definere elementer i Matrix
    B = Z_PI;
    C = Y_PI*(1+((Z_PI*Y_PI)/4));
    D = 1+((Z_PI*Y_PI)/2);

    G = [A B;                    % Matrix for medium linje model
          C D];
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    Pf = 0.95 ;
    phi = acos(Pf)

    Vr_TJE = (400*10^3)/(sqrt(3));
    Ir_TJE = 1.38*10^3*(cos(phi)-i*sin(phi)) ;% Energinet.dk's hjemmeside
    VIr_TJE = [Vr_TJE ; Ir_TJE];
    VIs_LOL = G*VIr_TJE

    Result_r = vpa(VIr_TJE,10)
    Result_s = vpa(VIs_LOL,10)
    absolut = abs(vpa(VIs_LOL,10))

    MVA = VIs_LOL(1)*conj(VIs_LOL(2))
    MVA_vi = angle(MVA)
    absMVA = abs(MVA)

```

Beregninger på eksisterende system 61 km. Print af matlab script

B

textbf61 km mellem Idomlund og Loldrup

```
clc
clear all
close all

%%% Conductor Data %%%
%%% Duplex Martin %%%
%%% Beregning af induktans på ny 400 kV parallel med 400 kV %%%
f = 50; % Frekvens 50 Hz
omega = 2*pi*f; %
Di = 36.17*10^-3; % Conductor diameter i meter.
r = Di/2; % Conductor radius i meter.
d = 0.40; % Bundle distance i meter
D_s = r*0.7788; % exp(-1/4)*r_c;
D_sb = (D_s*d)^(1/2); %
my_0 = 4*pi*10^-7; % H/m Henry pr. meter.
k = (my_0/(2*pi)); % Resultat er mH/km, miliHenry pr. km. 10^-6
Iso_1 = 4.00; % Længde på isolator kæde 400 kV i meter
Iso_2 = 1.70; % Længde på isolator kæde 150 kV i meter
R = 0.423; % Lederens resistans
rho = 100; % Resitivitet for jord
Af = 838; % Maksimale tilladte strøm i faseleder
Aj = 267; % Maksimale tilladte strøm i jordleder
ri = 0.0423e-3/2; % Konverteret til Ohmsk modstand
rd = 9.869*10^-7*f; %
De = 658.368*sqrt(rho/f); % Angivet i meter, Samme enhed som distance mellem faser

%%% Målsætning for beregning af indbyrdes afstande
X1 = 12.92; % i meter
X2 = 7.17; % Afrundet fra 10.37
X3 = 7.17; % Rundet op fra 12.92

Pilh_1 = 29.00;
Pilh_2 = 37.80;

Y1 = Pilh_1-Iso_1; % 29.00-Iso_1;

%%% Distanse fra Conductor A til de andre %%%
DAA = D_sb;
DAB = X1-X2;
DAC = X1+X3;
```

```

%%% Conductor B  %%%
DBA = X1-X2;
DBB = D_sb;
DBC = X2+X3;

%%% Conductor C  %%%
DCA = X1+X3;
DCB = X2+X3;
DCC = D_sb;

% Matrix(L) er induktans matrix
L = [log(De/DAA)   log(De/DAB)   log(De/DAC);
      log(De/DBA)   log(De/DBB)   log(De/DBC);
      log(De/DCA)   log(De/DCB)   log(De/DCC)];

Xl= i*omega*k*L;

% Matrix(Z) er linje impedans
Z = [ri+rd+Xl(1,1)  rd+Xl(1,2)  rd+Xl(1,3);
      rd+Xl(2,1)   ri+rd+Xl(2,2)  rd+Xl(2,3);
      rd+Xl(3,1)  rd+Xl(3,2)  ri+rd+Xl(3,3)];

%%% Transformation til symetriske sekvenser
syms a

a = -(1/2)+i*(sqrt(3)/2);      % Konvertering faktor for

T = [1  1  1;                % Rækkefølgen for sekvenser "+ - 0"
      a^2 a  1;              % Transformations matrix til sequenserne 'pno'
      a  a^2 1];

Z_pno = inv(T)*Z*T;          % Impedanse i symetriske sekvenser
ResultZ = vpa(Z_pno(1),5)    % 3 betyden cifre.

%
Sag = 8.00; % Største nedhæng+
Sag_avg = (8*2)/3; % Middell nedhæng

h1 = 25.00-Sag_avg;
% Y2 = 33.80-Sag;
% Y3 = 41.60;

%%% 2*1 leder bundet

D_sb = sqrt(D_s*d);

%%% x = a og y = b for alle ledernes koordinater
% H1 = 19.67;
% H2 = 28.47;

a11 = D_sb;
b11 = 2*h1;

a12 = X1-X2;
b12 = sqrt((X1-X2)^2+(2*h1)^2);

a13 = X1+X3;
b13 = sqrt((X1+X3)^2+(2*h1)^2);

a21 = X1-X2;
b21 = sqrt((X1-X2)^2+(2*h1)^2);

```

```

a22 = D_sb;
b22 = 2*h1;

a23 = X2+X3;
b23 = sqrt((X2+X3)^2+(2*h1)^2);

a31 = X1+X3;
b31 = sqrt((X1+X3)^2+(2*h1)^2);

a32 = X2+X3;
b32 = sqrt((X2+X3)^2+(2*h1)^2);

a33 = D_sb;
b33 = 2*h1;

%%%
% Eps_o er permitiviteten for luft

Eps_0 = 8.85*(10^(-12));

k =(2*pi*Eps_0)^-1;

%%%
P = [log(b11/a11) log(b12/a12) log(b13/a13);
      log(b12/a12) log(b22/a22) log(b23/a23);
      log(b31/a31) log(b32/a32) log(b33/a33)];
P_abc = k*P;
%%% fase conductor as coordin)ates %%%
C = P_abc^-1;

Y_abc = i*omega*C;      % Kapasitans for den fulde længde på 73 km.

%S_abc = inv(Xc_abc) % Admittans for den fulde længde på 73 km.

syms a % Registrere en variabel i matlab

a = -(1/2)+i*(sqrt(3)/2); % Variablen a gives en fast værdi = konstant

T = [1  1  1 ; %Transformation matrix
      a^2 a  1 ; %
      a  a^2 1]; %

Y_pno = inv(T)*Y_abc*T;
Result_Y = imag(Y_pno(1))

%

lenght = 61e3;
Z_PI = (Z_pno(1))*lenght; % Linje impedans for 61 km
Y_PI = (imag(Y_pno(1)))*i*lenght; % Shunt admittans for 61 km
A = 1+((Z_PI*Y_PI)/2); % Definere elementer i Matrix
B = Z_PI;
C = Y_PI*(1+(Z_PI*Y_PI)/4);
D = 1+((Z_PI*Y_PI)/2);

G = [A B; % Matrix for medium linje model
      C D];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
```

```

% Pf = 0.945;
% phi = 0.3332%acos(Pf) ;
% Radians = acos(0.95)
% S_3f = 1150*(cos(Radians)+i*sin(Radians))*10^6
Vr_LOL = 232767.2683 + 4494.803336i; % Værdien fra sende ende Lolstrup
Ir_LOL = 1310.897725 - 420.3536532i;% Værdien er Energinet.dk's hjemmeside
Vlr_LOL = [Vr_LOL ; Ir_LOL];
VIs_IDU = G*Vlr_LOL
% Vs = 227896.1 - 42720.0i; % Spændingen er 400 kV line-line. Derfor div. med sqrt(3) for Line-Neutral
% Is = 2000.0 - 0.0008699534i; % Max strøm der er tilledelig for for 2 x Martin leder
% VI_S = [Vs; Is]; %230 kV og 1 kA
% VI_R = inv(G)*VI_S % V-recieving end, I-recieving end
%
% V_abs = abs(VI_R)
%
% Result = vpa(VI_R,7)
Result_r = vpa(Vlr_LOL,10)
Result_s = vpa(VIs_IDU,10)
absolut = abs(vpa(VIs_IDU,6))
V_delt = abs(VIs_IDU(1))-abs(Vlr_LOL(1))
MVA = (VIs_IDU(1)*conj(VIs_IDU(2)))*3
MVA_vi = angle(MVA)*(180/pi)
absMVA = abs(MVA)

```


Beregninger på nyt system. Print af matlab script



```
clc
clear all
close all

%%% Conductor Data %%%
%%% Duplex Martin %%%
%%% Beregning af serie impedans på ny 400 kV parallel med 400 kV %%%

f = 50; % Frekvens 50 Hz
omega = 2*pi*f; %
Di = 36.17*10^-3; % Conductor diameter i meter.
r = Di/2; % Conductor radius i meter.
d = 0.40; % Bundle distance i meter
D_s = r*0.7788; % exp(-1/4)*r_c;
D_sb = (D_s*d)^(1/2); %
R = 0.0417; % Leder resistans
my_0 = 4*pi*10^-7; % H/m Henry pr. meter.
k1 = (my_0/(2*pi)); % Resultat er mH/km, miliHenry pr. km. Gnaget med 10^-6
Iso_1 = 4.00; % Længde på isolatorkæde 400 kV i meter

rho_j = 100; % Resitivitet for jord

ri = 0.0417e-3/2; % konverteret til Ohmsk modstand i leder på km. med *10^-3
rd = 9.869e-7*f; %
De = 658.368*sqrt(rho_j/f); % Angivet i meter, Skal være samme enhed som distance mellem faser

%%% Målsætning for beregning af indbyrdes afstande %%%

X1 = 12.92; % i meter
X2 = 10.37;
X3 = 7.17;
X4 = 7.17;
X5 = 10.37;
X6 = 12.92;

Y1 = 25.00;
Y2 = 33.80;

%%% Distancer mellem lederne %%%
%%% Conductor [A] %%%
DAA = D_sb;
DAB = sqrt((X1-X2)^2+(Y2-Y1)^2);
DAC = X1-X3;
DAA1 = X1+X6;
DAB1 = sqrt((X1+X5)^2+(Y2-Y1)^2);
```

```

DAC1 = X1+X4;

%%% Conductor [B] %%%
DBA = sqrt((X1-X2)^2+(Y2-Y1)^2);
DBB = D_sb;
DBC = sqrt((X2-X3)^2+(Y2-Y1)^2);
DBA1 = sqrt((X2+X4)^2+(Y2-Y1)^2);
DBB1 = 2*X3;
DBC1 = sqrt((X2+X6)^2+(Y2-Y1)^2);

%%% Conductor [C] %%%
DCA = X1-X3;
DCB = sqrt((X2-X3)^2+(Y2-Y1)^2);
DCC = D_sb;
DCA1 = X3+X4;
DCB1 = sqrt((X3+X5)^2+(Y2-Y1)^2);
DCC1 = X3+X4;

%%% Conductor [A1] %%%
DA1A = X6+X1;
DA1B = sqrt((X6+X2)^2+(Y2-Y1)^2);
DA1C = X6+X3;
DA1A1 = D_sb;
DA1B1 = sqrt((X6-X5)^2+(Y2-Y1)^2);
DA1C1 = X6-X4;

%%% Conductor [B1] %%%
DB1A = X5+X1;
DB1B = X5+X2;
DB1C = sqrt((X5+X3)^2+(Y2-Y1)^2);
DB1A1 = sqrt((X6-X5)^2+(Y2-Y1)^2);
DB1B1 = D_sb;
DB1C1 = sqrt((X5-X4)^2+(Y2-Y1)^2);

%%% Conductor [C1] %%%
DC1A = X4+X1;
DC1B = sqrt((X4+X2)^2+(Y2-Y1)^2);
DC1C = X4+X3;
DC1A1 = X6-X4;
DC1B1 = sqrt((X5-X4)^2+(Y2-Y1)^2);
DC1C1 = D_sb;

%%% Matrixform af induktansen L %%%
%%% Matrix(L) er induktans matrix %%%
L = [log(De/DAA) log(De/DAB) log(De/DAC) log(De/DAA1) log(De/DAB1) log(De/DAC1);
     log(De/DBA) log(De/DBB) log(De/DBC) log(De/DBA1) log(De/DBB1) log(De/DBC1);
     log(De/DCA) log(De/DCB) log(De/DCC) log(De/DCA1) log(De/DCB1) log(De/DCC1);
     log(De/DA1A) log(De/DA1B) log(De/DA1C) log(De/DA1A1) log(De/DA1B1) log(De/DA1C1);
     log(De/DB1A) log(De/DB1B) log(De/DB1C) log(De/DB1A1) log(De/DB1B1) log(De/DB1C1);
     log(De/DC1A) log(De/DC1B) log(De/DC1C) log(De/DC1A1) log(De/DC1B1) log(De/DC1C1)];

Xl= i*omega*k1*L; % Iduktans matrix omregnes til Impedans matrix. (ohm/m)

% Matrix(Z) for serie impedans
Z = [ri+rd+Xl(1,1) rd+Xl(1,2) rd+Xl(1,3) rd+Xl(1,4) rd+Xl(1,5) rd+Xl(1,6);
     rd+Xl(2,1) ri+rd+Xl(2,2) rd+Xl(2,3) rd+Xl(2,4) rd+Xl(2,5) rd+Xl(2,6);
     rd+Xl(3,1) rd+Xl(3,2) ri+rd+Xl(3,3) rd+Xl(3,4) rd+Xl(3,5) rd+Xl(3,6);
     rd+Xl(4,1) rd+Xl(4,2) rd+Xl(4,3) ri+rd+Xl(4,4) rd+Xl(4,5) rd+Xl(4,6);
     rd+Xl(5,1) rd+Xl(5,2) rd+Xl(5,3) rd+Xl(5,4) ri+rd+Xl(5,5) rd+Xl(5,6);
     rd+Xl(6,1) rd+Xl(6,2) rd+Xl(6,3) rd+Xl(6,4) rd+Xl(6,5) ri+rd+Xl(6,6)];

```

```

syms a % Definere MATLAB variabel

a = -(1/2)+i*(sqrt(3)/2); % Konvertering faktor a = 120 gr. og a^2 = 240 gr.

T = [1 1 1; a^2 a 1; a a^2 1]; % Transformations matrix til sekvenserne 'pno'

Tm = [1 1 1 0 0 0; % Transformation matrix er sat ind 1 0
      a^2 a 1 0 0 0; %
      a a^2 1 0 0 0; %

      0 0 0 1 1 1;
      0 0 0 a^2 a 1;
      0 0 0 a a^2 1];

Z_pno = inv(Tm)*Z*Tm;

ResultZ = vpa(Z_pno(1),3) % Resultat for sekvens impedans i 3 betyden cifre.

%%% Shunt admittans %%%

Iso_400 = 4.00;
Sag_avg = 8.00; % Middel nedhæng
sag = Sag_avg*(2/3);
%%% 2*1 leder bundet

D_sb = sqrt(D_s*d); % GMR fojr to leder

%%% x = a og y = b for alle ledernes koordinater %%%
Pilh_1 = 29.00;
Pilh_2 = 37.80;

Y1 = Pilh_1-Iso_400-8*(2/3); % Højde fra jorden til nederste fase
Y2 = Pilh_2-Iso_400-8*(2/3); % højde fra jorden til øverste fase

a11 = D_sb;
b11 = 2*Y1;

a12 = sqrt((X1-X2)^2+(Y2-Y1)^2);
b12 = sqrt((X1-X2)^2+(Y2+Y1)^2);

a13 = X1-X3;
b13 = sqrt((X1-X3)^2+(2*Y1)^2);

a14 = X1+X4;
b14 = sqrt((X1+X4)^2+(2*Y1)^2);

a15 = sqrt((X1+X5)^2+(Y2-Y1)^2);
b15 = sqrt((X1+X5)^2+(Y2+Y1)^2);

a16 = X1+X6;
b16 = sqrt((X1+X6)^2+(2*Y1)^2);

a21 = sqrt((X1-X2)^2+(Y2-Y1)^2);
b21 = sqrt((X1-X2)^2+(Y2+Y1)^2);

a22 = D_sb;
b22 = 2*Y2;

a23 = sqrt((X2-X3)^2+(Y2-Y1)^2);
b23 = sqrt((X2-X3)^2+(Y1+Y2)^2);

```

```
a24 = sqrt((X2+X4)^2+(Y2-Y1)^2);
b24 = sqrt((X2+X4)^2+(Y2+Y1)^2);

a25 = X2+X5;
b25 = sqrt((X2+X5)^2+(2*Y2)^2);

a26 = sqrt((X2+X6)^2+(Y2-Y1)^2);
b26 = sqrt((X2+X6)^2+(Y1+Y2)^2);

a31 = X1-X3;
b31 = sqrt((X1-X3)^2+(2*Y1)^2);

a32 = sqrt((X3-X2)^2+(Y2-Y1)^2);
b32 = sqrt((X3-X2)^2+(Y2+Y1)^2);

a33 = D_sb;
b33 = 2*Y1;

a34 = X3+X4;
b34 = sqrt((X3+X4)^2+(2*Y1)^2);

a35 = sqrt((X3+X5)^2+(Y2-Y1)^2);
b35 = sqrt((X3+X5)^2+(Y2+Y1)^2);

a36 = X3+X6;
b36 = sqrt((X3+X6)^2+(2*Y1)^2);

a41 = X1+X4;
b41 = sqrt((X1+X4)^2+(2*Y1)^2);

a42 = sqrt((X4+X2)^2+(Y2-Y1)^2);
b42 = sqrt((X4+X2)^2+(Y2+Y1)^2);

a43 = X4+X3;
b43 = sqrt((X4+X3)^2+(2*Y1)^2);

a44 = D_sb;
b44 = 2*Y1;

a45 = sqrt((X5-X4)^2+(Y2-Y1)^2);
b45 = sqrt((X5-X4)^2+(Y2+Y1)^2);

a46 = X6-X4;
b46 = sqrt((X6-X4)^2+(2*Y1)^2);

a51 = sqrt((X5+X1)^2+(Y2-Y1)^2);
b51 = sqrt((X5+X1)^2+(Y2+Y1)^2);

a52 = X5+X2;
b52 = sqrt((X5+X2)^2+(2*Y2)^2);

a53 = sqrt((X5+X3)^2+(Y2-Y1)^2);
b53 = sqrt((X5+X3)^2+(Y2+Y1)^2);

a54 = sqrt((X5-X4)^2+(Y2-Y1)^2);
b54 = sqrt((X5-X4)^2+(Y2+Y1)^2);

a55 = D_sb ;
b55 = 2*Y2;

a56 = sqrt((X6-X5)^2+(Y2-Y1)^2);
b56 = sqrt((X6-X5)^2+(Y2+Y1)^2);
```

```

a61 = X1+X6;
b61 = sqrt((X6+X1)^2+(2*Y1)^2);

a62 = sqrt((X6+X2)^2+(Y2-Y1)^2);
b62 = sqrt((X6+X2)^2+(Y2+Y1)^2);

a63 = X6+X3;
b63 = sqrt((X6+X3)^2+(2*Y1)^2);

a64 = X6-X4;
b64 = sqrt((X6-X4)^2+(2*Y1)^2);

a65 = sqrt((X6-X5)^2+(Y2-Y1)^2);
b65 = sqrt((X6-X5)^2+(Y2+Y1)^2);

a66 = D_sb;
b66 = 2*Y1;
%%%

Eps_0 = 8.85*(10^(-12));          % Eps_o er permitiviteten for luft;

k2 =(2*pi*Eps_0)^-1;              % Konstant for 2*pi*Epsilon_0;

%%% Proportional faktor matrice %%%

P_abc = k2* [log(b11/a11) log(b12/a12) log(b13/a13) log(b14/a14) log(b15/a15) log(b16/a16);
log(b21/a21) log(b22/a22) log(b23/a23) log(b24/a24) log(b25/a25) log(b26/a26);
log(b31/a31) log(b32/a32) log(b33/a33) log(b34/a34) log(b35/a35) log(b36/a36);
log(b41/a41) log(b42/a42) log(b43/a43) log(b44/a44) log(b45/a45) log(b46/a46);
log(b51/a51) log(b52/a52) log(b53/a53) log(b54/a54) log(b55/a55) log(b56/a56);
log(b61/a61) log(b62/a62) log(b63/a63) log(b64/a64) log(b65/a65) log(b66/a66)];

C = inv(P_abc);                  % Capacitans F/m

Y_abc = i*omega*C; %*73000       % Admittans for den fulde længde på 73 km.

syms a                            % Registrere en variabel i matlab

a = -(1/2)+i*(sqrt(3)/2);         % Variablen a gives en fast værdi = konstant

T = [1  1  1  0 0 0;            %Transformation matrix er sat ind 1 0
a^2 a  1  0 0 0;              %
a  a^2 1  0 0 0;
0 0 0  1  1  1;
0 0 0  a^2 a  1;
0 0 0  a  a^2 1];

Y_pno = inv(T)*Y_abc*T;         % Admittans i +-0 sequence
Result_Y = imag(Y_pno(1)); %

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

lenght = 73e3;
Z_PI = (Z_pno(1))*lenght; % Linje impedans for 73 km
Y_PI = (imag(Y_pno(1)))*i*lenght; % Shunt admittans for 73 km
A = 1+((Z_PI*Y_PI)/2); % Definere elementer i Matrix
B = Z_PI;
C = Y_PI*(1+(Z_PI*Y_PI)/4);
D = 1+((Z_PI*Y_PI)/2);

```

```

G = [A B;          % Matrix for medium linje model
     C D];

Vs = (400/sqrt(3))*10^3; % Spændingen er 400 kV line-line. Derfor div. med sqrt(3) for Line-Neutral
Is = 1e3*2;           % Max strøm der er tilledelig for for 2 x Martin leder
VI_S = [Vs; Is];     % 230 kV og 1 kA
VI_R = inv(G)*VI_S   % V-recieving end, I-recieving end
Vr = (400*10^3)/(sqrt(3));
I = 1.38e3 ;         % Værdien er Energinet.dk's hjemmeside
pf = 0.95 ;
phi = acos(pf);      %
Ir = I*(cos(phi)-i*sin(phi));
Ir_pno = inv(T)*Ir;
VIr = [Vr ; Ir];
VIs = G*VIr;
VI_R_abs = abs(VI_R) % Absolut værdien af V og I
Result_r = vpa(VIr,10) % Værdier for modtage siden i kompleks tal
Result_s = vpa(VIs,10) % Værdier for sende siden i kompleks tal
abs_s = abs(vpa(VIs,10)) % Absolut værdier for sende siden
abs_r = abs(vpa(VIr,10)) % Absolut værdien for modtage siden
%vinkel = vpa(angle(VIs),7)*(180/pi) % Vinklen på spænding og strøm sende siden
k3=sqrt(3);          % Konstant = kvadratrod 3
delta_v = vpa((abs_s(1)*k3-abs_r(1)*k3),5) % Spændings forskel mellem sende- og modtage-side

VR = (delta_v(1)/abs_r(1))*100 % Reguleringsværdi for spændingen på modtagesiden i procent

MVA_s = (VIs(1)*conj(VIs(2)))*3 % Den nominelle effekt (S) for hver linje der skal leveres fra Idomlund
abs_MVA_s = abs(MVA_s) % Absolut værdien for maksimal belastning på en linje
Vink_MVA_s = angle(MVA_s)*(180/pi)%angle(VIs(1)*conj(VIs(2)))*(180/pi) % Vinklen (pf) på en linje med last på 1
P = abs_MVA_s*cos(phi) % Den totale aktive effekt for hver linje
Q = abs_MVA_s*sin(phi) % Den reaktive effekt for hver linje

```