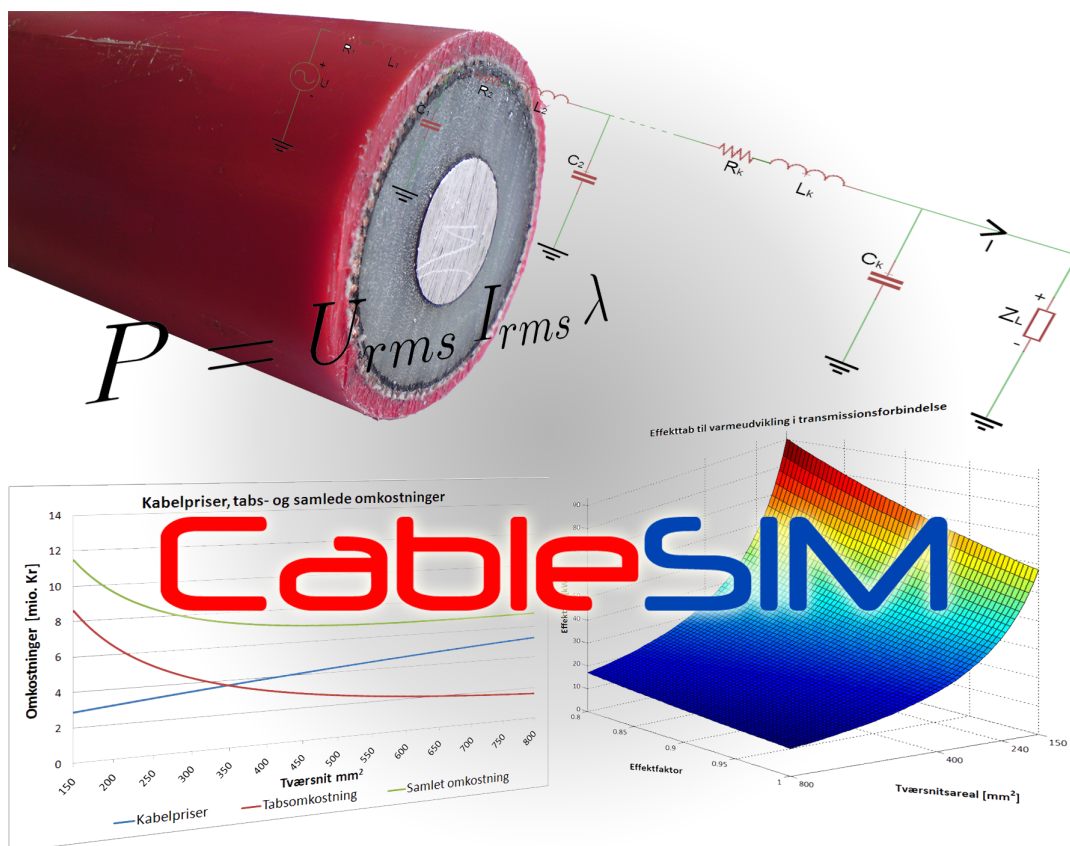


Teknisk-økonomisk model og analyse for kabellægning af 60 kV luftledninger



P2 PROJEKT
 GRUPPE B223
 INS BASIS, ENERGITEKNIK
 AALBORG UNIVERSITET
 25. MAJ 2009

Titel: Teknisk-økonomisk model og
analyse for kabellægning af 60 kV
luftledninger

Synopsis:

Tema: Modellernes virkelighed

Projektperiode:

P2, forårssemesteret 2009

Projektgruppe:

B223

Deltagere:

Jens Henning Bitsch

Steffen Christensen

Christian Frandsen

Nicolai Breinholt Groth

Sveinn Rúnar Júlíusson

Casper Vadstrup

Christian Aaen

Vejledere:

Ewen Ritchie

Morten Boje Blarke

Oplagstal: 12

Sidetal: 94

Afsluttet den 25. maj 2009

Udviklingen af det danske elnet går imod en kabellægning af de nuværende luftledninger. Det er derfor interessant at afgøre hvilken kabeltype, der er den bedste erstatning for en luftledning. I denne sammenhæng fokuseres der bl.a. på det energitab, som opstår i en leder under drift, samt hvilke parametre der påvirker størrelsen af tabet. Udfra disse parametre modelleres en kabellægning af en 60 kV luftledning, hvor kabelløsningen med det mindste energitab bestemmes.

Resultaterne fra modelleringen opgøres økonomisk med gennemsnitspriser fra Nord Pool, og holdes sammen med priser for kabler for således at bestemme den mest rentable kabelløsning.

For et bestemt scenarie, hvor der leveres en effekt på 10 MW ved en effektfaktor på 0,9 over en 10 km lang strækning, er det mest rentable kabelvalg PEX-M-AL-LT 72 kV med et ledertværsnit på 630 mm².

Forord

Denne rapport er udarbejdet på 2. semester af gruppe B223, Energiteknik, Aalborg Universitet, under temaet *Modellernes virkelighed*. Baggrunden for valg af emnet *kabellægning af luftledningsanlæg*, har været en fælles interesse for strømteori, samt et ønske om at opnå en dybere praktisk og teoretisk forståelse for elektriske kredsløb. Den grundlæggende viden vi gennem projektperioden har tilegnet os, håber vi at kunne videreføre til brug i senere semestre.

Gennem rapporten er der henvist til kilder efter Harvard-metoden [Kilde, årstal], som refererer til kildelisten bagerst i rapporten. Til rapporten medfølger en CD-rom, som indeholder rapportens model opstillet i computerprogrammet MATLAB, måleresultater fra forsøgene, rapporten i pdf-format og bilag.

Gennem projektetforløbet har gruppen haft kontakt til en række eksperter, som har bidraget til forståelse af emnet. I denne forbindelse har gruppen været på virksomhedsbesøg hos netselskaberne HEF og Nyfors, hvor vi bl.a. er blevet informeret om netselskabernes ansvar og opgaver samt distributionsnettets opbygning. Der skal derfor lyde en stor tak til HEF og Nyfors, og en særlig tak til Gert Sørensen, Elchef hos Nyfors, som gennem e-mailkorrespondance har besvaret spørgsmål stillet af gruppen. Derudover skal der lyde en stor tak til Unnur Stella Gudmundsdottir, Ph.d. studerende ved Aalborg Universitet, der har bidraget til den teoretiske forståelse af emnet. Endelig vil vi gerne takke Per Sørensen, Regionschef Vest hos NKT Cables, for vejledende priser på kabler.

_____	_____
_____	_____
_____	_____

Indholdsfortegnelse

Symbolforklaring	ix
Kapitel 1 Elnettet og planer for kabellægningen	1
1.1 Elinfrastrukturen i Danmark	3
1.1.1 Produktion	4
1.1.2 Transmission	5
1.1.3 Distribution	7
1.2 Nettab	9
1.3 Problemformulering	12
Kapitel 2 Opbygning og anlæggelse af kabler & luftledninger	13
2.1 Opbygning af luftledninger	13
2.2 Opbygning af højspændingskabler	15
Kapitel 3 Teoretisk grundlag for tabsberegning	19
3.1 3-faset vekselstrøm	19
3.2 Vekselstrøm og -spænding	20
3.3 Elektrisk modstand	21
3.4 Komplekse spændingskilder	23
3.5 Impedans	25
3.6 Effekt	28
3.6.1 Effektfaktor	28
3.7 Strømførtængning	29
3.8 Kredsløbsreduktion	29
3.9 Forsøgsrække	31
3.9.1 Måling af impedans	31
3.9.2 Måling af effekt	41
Kapitel 4 Modellering af effekttab	45
4.1 Eltransmissionskredsløbet	46
4.2 Kredsløbsanalyse	47

4.3	Resultater	50
Kapitel 5	Teknisk-økonomisk model og analyse	53
5.1	Økonomisk opgørelse af energitabet	53
5.1.1	Nord Pool Spot	53
5.1.2	Materiale priser	55
5.1.3	Kabelpriser	56
5.1.4	Levetid	57
5.1.5	Optimering af rentabiliteten	57
5.2	Etableringsomkostninger	60
5.2.1	Erstatning til grundejere	61
5.3	Vedligeholdelse	63
5.4	CableSIM	65
Kapitel 6	Konklusion	67
Kapitel 7	Perspektivering	69
7.1	Visuel forurening	69
7.2	Koronastøj	71
7.3	Magnetfelters indvirkning på helbredet	72
7.4	Leveringssikkerhed	73
7.4.1	Årsager til afbrud	74
7.5	Opsummering	76
Bilag A	SI-enheder	77
Bilag B	Transport af energi i elektriske ledere	79
Litteratur		81

Symbolforklaring

A	Tværsnitsareal [mm ²]
C	Kapacitans [F]
f	Frekvens [Hz]
I	Konstant strømstyrke [A]
i	Varierende strømstyrke [A]
$\mathbf{I}$	Strømviser [A]
l	Længde [m]
L	Induktans [H]
P	Effekt [W]
Q	Konstant elektrisk ladning [C]
q	Varierende elektrisk ladning [C]
R	Resistans [Ω]
T	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
T	Periodetid [s]
t	Tid [s]
U	Konstant spænding [V]
u	Varierende spænding [V]
$\mathbf{U}$	Spændingsviser [V]
V	Elektrisk potentiale [V]
W	Arbejde [J]
Z	Impedans [Ω]
X	Reaktans [Ω]
α	Temperaturkoefficient for elektrisk modstand [K^{-1}]
ϕ	Faseforskydelsesvinkel
λ	Effektfaktor
θ og Θ	Fasevinkel
ρ	Resistivitet [Ωm]
σ	Konduktivitet [S/m]
ω	Vinkelhastighed [rad/s]

Elnettet og planer for kabellægningen

1

Udviklingen i det danske elnet går imod en kabellægning af elnettet. Ifølge et notat fra energistyrelsen, skal alle nye forbindelser under 100 kV etableres som kabler. Samtidig skal de eksisterende luftledninger under 100 kV skal kabellægges, når ledningerne er uheldigt placeret i forhold til bebyggelse eller naturskønne områder. Derudover tilstræbes det, hvor det er muligt, at reducere det samlede luftledningsnet over 100 kV. Det er dog både besværligt og meget dyrt, at kabellægge forbindelser på højere spændingsniveauer [Energistyrelsen, 2008].

Ved gennemførelsen af kabellægningen giver samtidig mulighed for at omstrukturere nettet, og således imødekomme de fremtidige planer for energisektoren. Regeringen har eksempelvis som mål, at ca. 50 % af det danske elforbrug i år 2025 skal komme fra vindkraft. Indpasningen af mere vindkraft i elsystemet handler både om tilslutning af vindmøller og afsætning af produktionen til nettet. Da elproduktionen fra vindkraft følger vejret og ikke nødvendigvis forbruget, vil mængden af overskuds-el i fremtidens elsystem afhænge endnu mere af vejret, end den gør i dag. Dette kræver et elnet med høj kapacitet på de internationale forbindelser, samt et kraftigt indenlands elnet [Energinet.dk, 2008b].

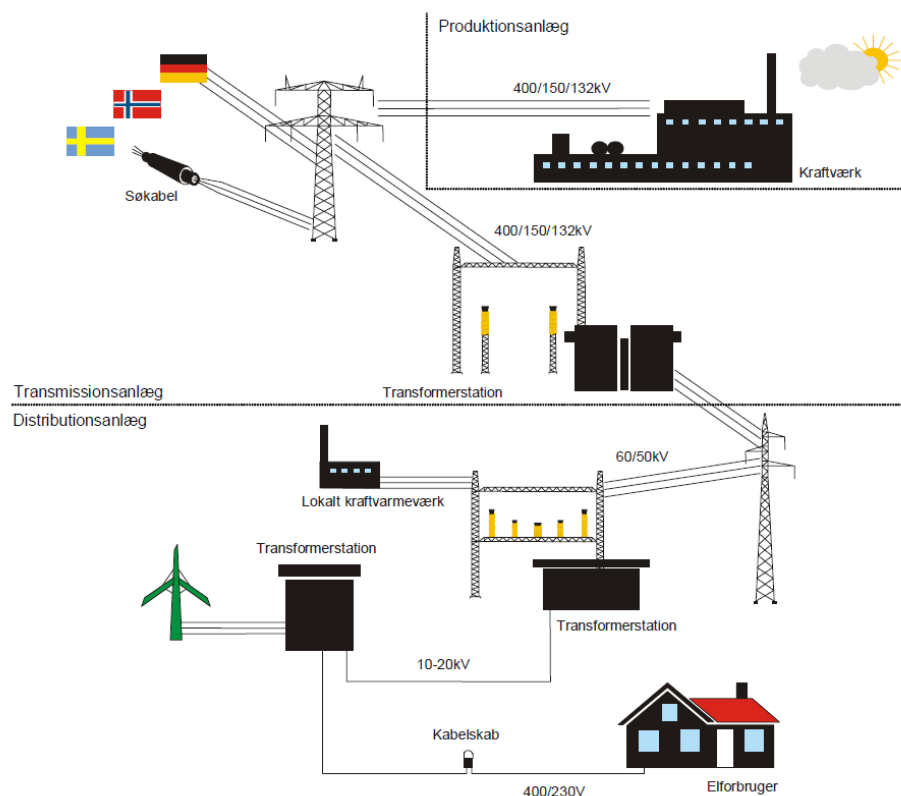
For at kunne indpasse mere vindenergi, større samhandel med nabolande og forbedre forsyningssikkerheden, skal transmissionsnettet udbygges. Nye 150/132 kV forbindelser etableres som kabler, mens de nuværende 150/132 kV luftledninger kabellægges efter en prioriteret liste. Listen prioriteres ud fra strækningernes miljømæssige belastning og nærheden til byområder, som sammenholdes med restlevetiden på de enkelte strækninger. I 400 kV-nettet er det ligeledes målet at kabellægge alle forbindelser. Det er dog meget dyrt, og rent teknisk en stor udfordring at kabellægge forbindelser på dette spændingsniveau. Da der samtidig er behov for at opgradere eksisterende forbindelser, vil disse hovedsagligt blive opført som luftledninger. Der vil for nogle af 400 kV luftledningerne ske en forskønnelse

af tracéerne. Dette sker fx ved at kabellægge korte strækninger omkring byområder og naturområder af national interesse, opstille master i nyt design, eller justere eksisterende tracéers rute over kortere afstande [Energistyrelsen, 2008].

På de lavere spændingsniveauer fortsætter netselskaberne med at kabellægge deres eksisterende luftledninger, hvilket de primært gør af hensyn til forsyningssikkerheden [Sørensen, 2009a]. Det meste af 0,4-20 kV-nettet er allerede kabellagt, og derfor er det 60 kV nettet, der fra netselskabernes side fokuseres på i fremtiden.

1.1 Elinfrastrukturen i Danmark

Danmarks nuværende elsystem kan overordnet deles op i produktion, transmission, distribution og forbrug. Energien produceres på de centrale og decentrale produktionsenheder, og transporteres via transmissions- og distributionsnettet ud til forbrugeren. Pr. definition betragtes alt over 100 kV som værende transmissionsnettet, og alt under 100 kV som distributionsnettet [Sørensen, 2009a]. Som det fremgår af figur 1.1, er de største kraftværker tilkoblet transmissionsnettet, og de mindre lokale værker tilkoblet distributionsnettet. Udlandsforbindelserne benytter sig af transmissionsnettet, bortset fra forbindelsen imellem Bornholm og Sverige på 60 kV. I 2007 var importen af elektricitet fra udlandet 10426 GWh, mens eksporten var på 11377 GWh. Nettoeksporten var på 951 GWh [Energinet.dk, 2007].



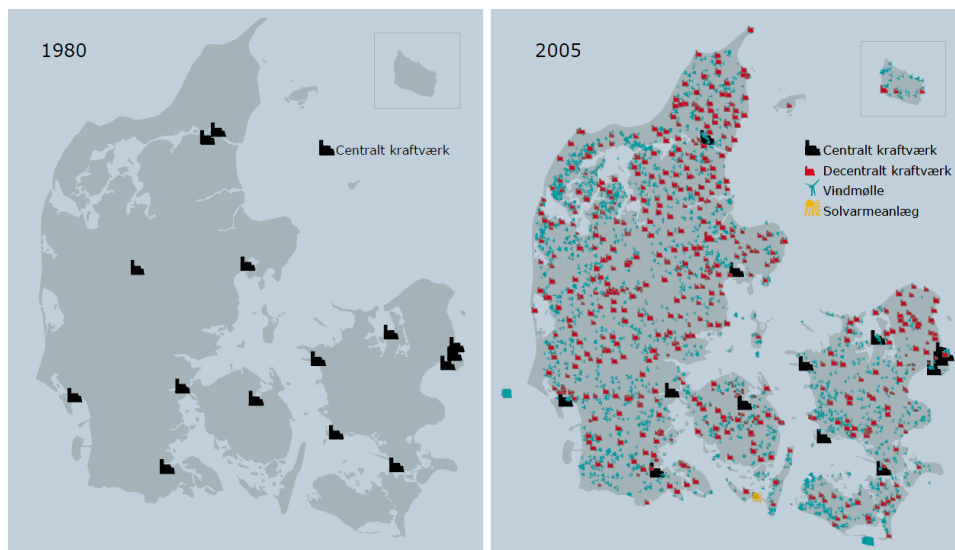
Figur 1.1. Energiflowet fra produktion til forbruger. Herimellem findes transmissionsnettet med spændingsniveauer fra 132-400 kV, samt distributionsnettet med spændingsniveauer fra 0,4-60 kV [Nærføringsudvalget, 2006].

1.1.1 Produktion

Fra 1980'erne og fremefter er der sket en markant ændring i den danske elproduktion. Som det fremgår af figur 1.2, blev elektriciteten hovedsagligt produceret på de store centrale værker, mens en stor mængde i dag produceres decentralt af bl.a. vindmøller og lokale kraftvarmeværker.

Elproduktionen i Danmark er på nuværende tidspunkt karakteriseret ved, at hænge sammen med produktionen af varme. Dette gøres for at udnytte energien i brændslet bedst muligt, til gavn for både miljø og økonomi.

Derfor er de store centrale værker ofte placeret i sammenhæng med større byer med adgang til kølevand, og med muligheder for levering af store mængder brændsel. Af Danmarks 15 centrale værker, leverer 13 af dem både el og varme.



Figur 1.2. Beliggenheden af Danmarks elproduktion i 1980 og 2005. De centrale værker er markeret med sort, de decentrale værker med rødt, mens vindmøller og solvarmeanlæg er henholdsvis blå og gul [Energinet.dk, 2007]

I 2007 blev der produceret 37,4 TWh i Danmark. 61 % af elproduktionen blev produceret på de centrale værker, 19 % af vindkraft og den resterende andel, på ca. 20 %, på de decentrale værker [Dansk Energi, 2007].

Den store andel af kraftvarmeværker og vindmøller i den samlede elproduktion betyder, at der ofte kan opstå ubalance mellem produktion og forbrug. Denne ubalance, nogle gange refereret til som eloverløb, kan bl.a. opstå i perioder med et lavt elforbrug, stort varme behov og samtidig stor elproduktion fra vindmøllerne. Den nuværende sammensætning af produktionsapparatet kræver derfor stor fleksibilitet i elnettet.

Ubalance imellem produktion og forbrug kan også være årsagen til, at prisen på elektricitet falder voldsomt på elmarkedet, hvor Danmark i nogle tilfælde er nødsaget til, at sælge strømmen billigt til udlandet. I sådanne tilfælde vil eksempelvis Sverige og Norge gerne købe billig strøm fra Danmark, da de igennem deres vandkraftanlæg, forholdsvis nemt, kan regulere deres egen elproduktion.

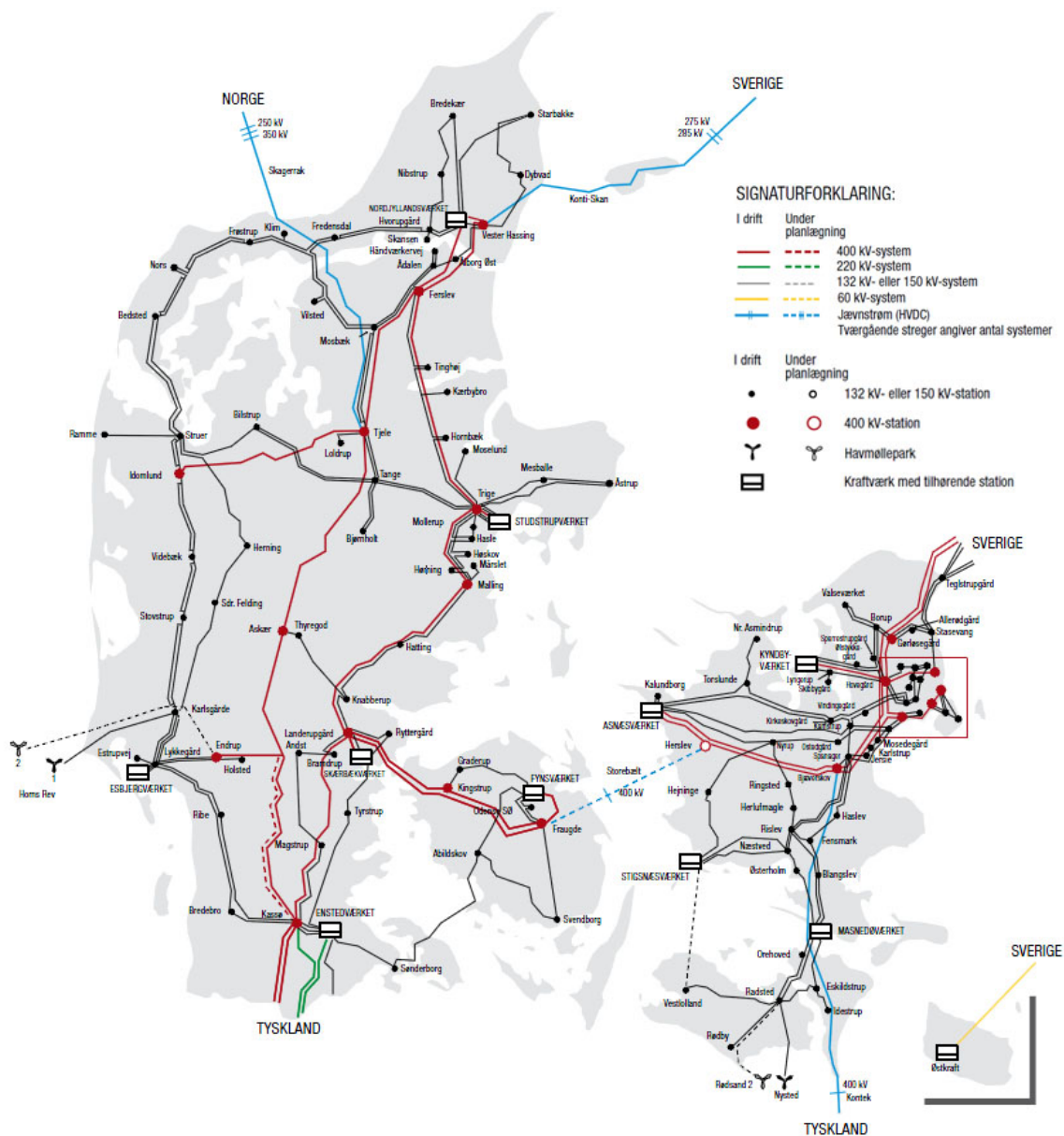
Er der omvendt mangel på elektricitet, dækkes denne ved import fra udlandet.

1.1.2 Transmission

Det danske elnet begyndte som små jævnstrømsforbindelser i lokale byområder. Efterhånden som efterspørgslen på elektricitet steg, blev det nødvendigt at transportere energi over større strækninger. For at undgå for store energitab, blev elsystemet skiftet til vekselstrøm i årene lige før og efter 2. verdenskrig. Dette gjorde det muligt at koble flere produktionsenheder på samme net, og samtidig blev det nemmere at transformere op og ned imellem forskellige spændingsniveauer.

I 1950'erne og 1960'erne steg elforbruget i Danmark yderligere, og derfor blev der bygget større centrale kraftværker. Den øgede produktion, samt den mere centrale placering af værkerne, resulterede igen i en større energioverførsel over længere strækninger. For at skabe en større kapacitet i elnettet, og for samtidig at minimere nettabet, blev transmissionsnettet på 132/150 kV oprettet. Udlandsforbindelserne og de centrale kraftværker blev udbygget op gennem 1970'erne, 1980'erne og i begyndelsen af 1990'erne, hvilket resulterede i oprettelsen af 400 kV nettet [Energinet.dk, 2007].

Danmarks transmissionsnet udgøres i dag af spændingsniveauer fra 132-400 kV. 400 kV nettet samt dele af udlandsforbindelserne drives og ejes af det statsejede selskab Energinet.dk. Herudover driver Energinet.dk 132/150 kV nettet, men en del af dette net ejes fortsat af 10 regionale transmissionsselskaber. Lovgivningen forudsætter dog, at Energinet.dk har købsret på disse forbindelser, hvis disse sælges. Alt i alt har Energinet.dk det overordnede ansvar for forsyningssikkerheden og for at holde en effektiv drift, der kan fremme konkurrencen [Dansk Energi, 2007].



Figur 1.3. Transmissionsnettet anno 2007, med samtlige 132/150 og 400 kV forbindelser samt udlandsforbindelserne. Af billedet fremgår også den planlagte jævnstrømsforbindelse mellem Øst- og Vestdanmark, som forventes færdig i 2010 [Dansk Energi, 2007].

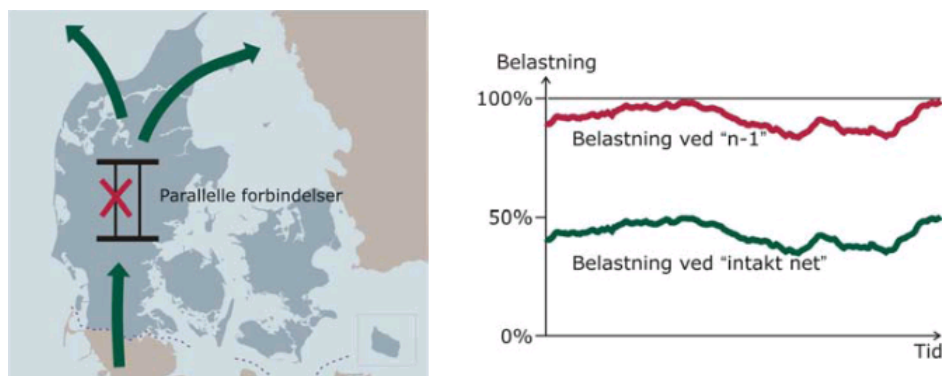
I Jylland og på Fyn er transmissionsnettet baseret på 150 kV og 400 kV med en enkelt forbindelse på 220 kV til Tyskland, se figur 1.3. Transmissionsnettet i Vestdanmark er synkroniseret med den europæiske frekvens. Sjælland anvender derimod 132 kV og 400 kV til transmission, og kører synkront med bl.a. Sverige og Norge.

Transmissionsnettet drives formasket og i parallel.

Ved formasket net forstås, at nettet mindst har en tosidet forsyning. Dette er af

afgørende betydning, hvis en forbindelse falder ud, da forsyningen blot sker igennem den anden. Som udgangspunkt drives nettet efter n-1 princippet eller bedre, hvilket vil sige, at driften af elsystemet skal kunne opretholdes ved udfald af mindst én vilkårlig netkomponent, også under planlagte ombygninger.

Parallelt opbygget net betyder, at forskellige spændingsniveauer kan indgå i samme maske. Dvs. at hvis en 400 kV forbindelse mangler, overtages forsyningen af de andre forbindelser i masken, eksempelvis på 132/150 kV niveauet. Selve overførselsevnen i en 132/150 kV forbindelse er 3-6 gange mindre end i en 400 kV forbindelse, hvilket resulterer i en højere belastning af forbindelserne. For at den fulde kapacitet, med hensyn til n-1 sikkerhed, kan udnyttes, er det vigtigt at 400 kV masken er komplet [Energinet.dk, 2007].



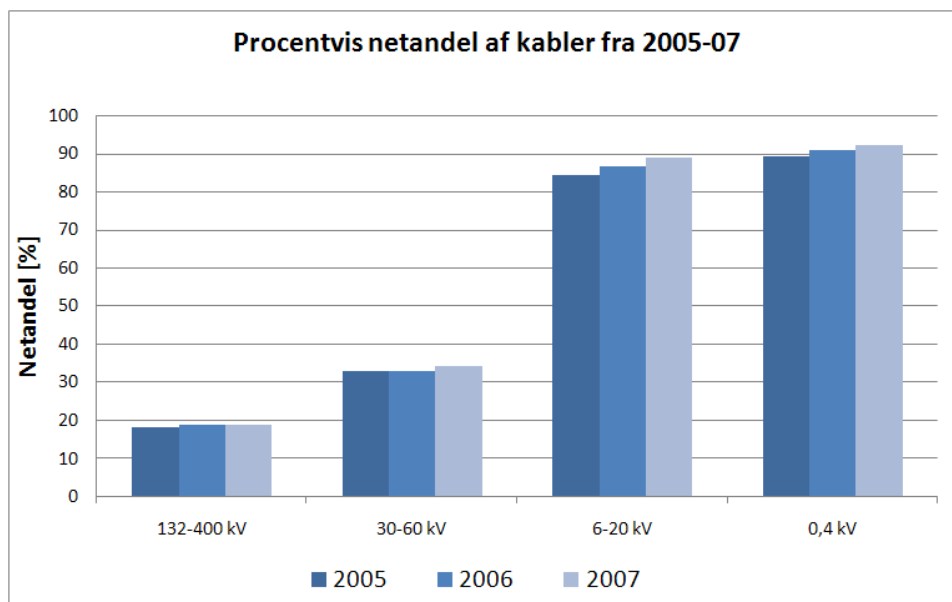
Figur 1.4. Et eksempel på et belastningsforhold ved intakt net og ved anvendelse af n-1 forsyningssikkerhed [Energinet.dk, 2007].

Som det fremgår af figur 1.4, stiger belastningen ved fejl på nettet. Derfor må der ved n-1 princippet aldrig være for store belastninger i transmissionsnettet. Hvis der sker yderligere fejl, der gør at belastningen bliver for høj, vil det kunne medføre permanente skader og resultere i strømafbrydelse [Energinet.dk, 2008c].

1.1.3 Distribution

I distributionsnettet transporteres energien fra transmissionsnettet og mindre produktionsenheder, ud til forbrugeren på lavere spændingsniveauer fra 60-0,4 kV. Denne del af elnettet håndteres af omkring 100 netselskaber, der har bevilling til at drive, vedligeholde og udbygge nettet i deres afgrænsede område. Netselskabernes opgave består derfor i, at sikre en tilstrækkelig og effektiv transport af el, tilslutte kunder og mindre producenter til elnettet, samt måle leverancer og elforbrug i elnettet. Derudover har selskaberne til opgave at administrere offentlige pålæg,

luftledninger. Længden af kabler og luftledninger blev i 2007 opgjort til 170.000 km, hvoraf ca. 85 % er kabellagt. Dette er fordelt med 17 % for 400-132 kV niveau, 34 % for 60-30 kV niveau, 89 % for 20-6 kV niveau og 94 % for 0,4 kV niveau. Figur 1.6 viser udvikling for kabellægning fra 2005 til 2007 for forskellige spændingsniveauer. Det skal dog bemærkes, at distancerne er opgjort ved system-kilometer, hvilket betyder, at hver leder indgår med sin længde, selvom der er flere ledere i samme tracélinje.



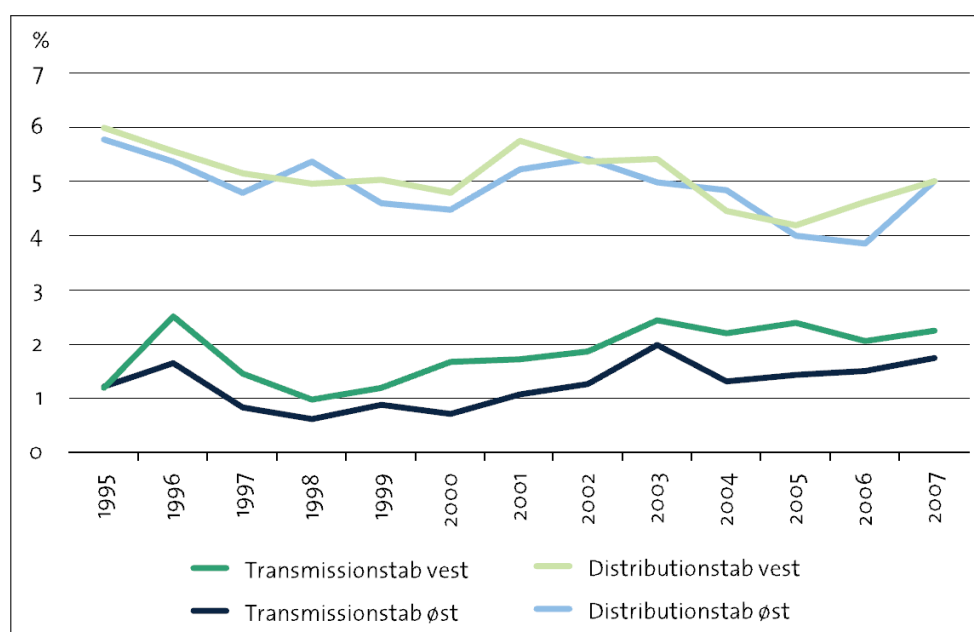
Figur 1.6. Grafen viser hvor stor en andel af nettet der er kabellagt på hvert spændingsniveau i årene 2005-2007. Data fra: [Dansk Energi, 2007].

1.2 Nettab

Ved anlæggelse af kabler i stedet for luftledninger, opfyldes ønsket om en kabellægning af nettet, og samtidig forbedres forsyningssikkerheden, da kabler i jorden ikke bliver ødelagt af storme. Dog er kabelforbindelsen også på andre punkter forskellig fra luftledningen. Når den elektriske leder isoleres og lægges i jorden, får den andre elektriske egenskaber, end når den hænger frit i luften. Lederens elektriske egenskaber afhænger bl.a. af dens tykkelse, længde og dens materiale, hvilket vil blive beskrevet nærmere senere i rapporten. Denne forskel på kabler og luftledninger betyder, at der vil opstå et energitab ved transport af energi i kabler, som er forskelligt fra det i luftledninger. Jo større energitabet er i lederen, jo mere energi skal der produceres for at forsyne forbrugeren [Energinet.dk, 2008e]. Det er derfor væsentligt at minimere energitabet. Hvordan dette tab ændrer sig i kabler, i forhold til luftledninger, undersøges senere i rapporten.

Ordet *nettab* er et udtryk for det samlede energitab i elnettet, som udgør forskellen mellem den producerede energi og den forbrugte energi. I Danmark havde vi i 2007 et samlet nettab på ca. 2506 GWh, hvoraf 740 GWh blev tabt i transmissionen og 1766 GWh i distributionen. Til sammenligning var Danmarks netto elproduktion, der er den mængde el, der bliver leveret til nettet, samme år 37024 GWh.

Som tidligere beskrevet er Danmarks elnet delt op i Øst og Vest, så for at beskrive hvor meget tabet udgør af produktionen i procent, er det nødvendigt at se særskilt på de to net. Tabet udgjorde i Østdanmark og Vestdanmark hhv. 6,7 % og 7,3 % af den samlede elproduktion [Energinet.dk, 2008e].



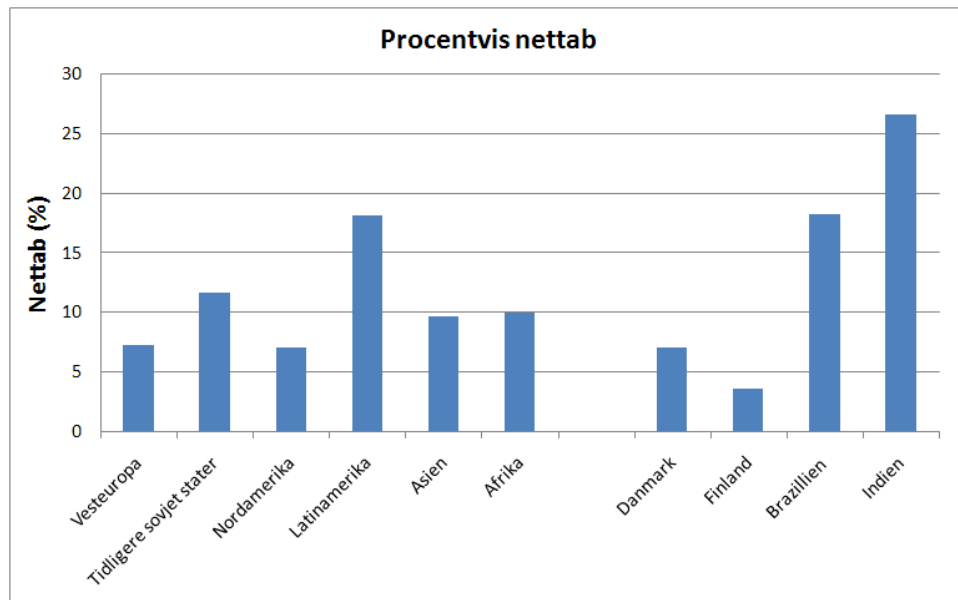
Figur 1.7. Udviklingen i nettab for transmissionsnettet og distributionsnettet i henholdsvis Øst- og Vestdanmark i perioden 1995-2007 [Energinet.dk, 2008e].

Figur 1.7 viser, hvordan nettabet i hhv. transmissionsnettet og distributionsnettet har udviklet sig i perioden 1995-2007. Som det fremgår, har nettabet i distributionsnettet ligget omkring 5 %, mens tabet i transmissionsnettet har ligget omkring 1-2 %. Transmissionstabet for Vestdanmark har i hele perioden været lidt højere end i Østdanmark.

Tab i elnettet kan ikke helt undgås, men både Energinet.dk og netselskaberne forsøger så vidt muligt, at reducere tabet. Som tidligere nævnt er det Energinet.dk, som er den systemansvarlige for transmissionsnettet, og i denne del af nettet er tabet i høj grad påvirket af elhandel med udlandet. I distributionsnettet afhænger tabet af, hvordan de lokale netselskaber er placeret. Eksempelvis vil en kortere afstand mellem producenten og forbrugeren betyde et mindre tab. I både transmissionsnettet

og distributionsnettet kan en opgradering af spændingsniveauet reducere tabet, fx ved at ændre 150 kV til 400 kV eller 10 kV til 60 kV [Energinet.dk, 2008e].

Figur 1.8 viser en oversigt over nettabet for forskellige verdensdele/lande. Danmarks tabsprocent er lidt lavere end verdens gennemsnitlige tab på ca. 9,2 %.



Figur 1.8. Nettabet i år 2000 målt i procent i forskellige verdensdele, samt i enkelte lande. Data fra: [Energy, 2005])

I år 2000 var verdens samlede nettab 1342 TWh, svarende til knap 40 gange Danmarks elforbrug i år 2007, hvilket fremhæver betydningen af en lav tabsprocent [Dansk Energi, 2007],[IEA, 2003]. De enkelte landes nettab varierer fra 3,7 % til 26,7 %, og som figuren også viser, er der i nogle dele af verden stort potentiale for at reducere nettabet.

1.3 Problemformulering

På baggrund af planerne om kabellægning af det danske elnet, ses der nærmere på nettab for henholdsvis luftledninger og kabler. Da det største nettab opstår i distributionsnettet, tages der udgangspunkt i denne del af nettet. Som tidligere nævnt, er store dele af distributionsnettet allerede kabellagt med undtagelse af ca. to tredjedele af 30-60 kV nettet. Rapporten afgrænses derfor til kun at beskæftige sig med 60 kV nettet.

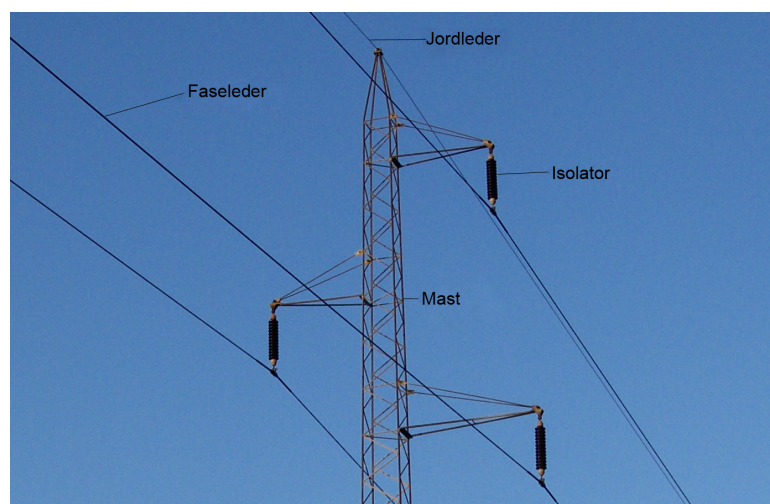
I rapporten undersøges det, hvilke konsekvenser det har, med hovedvægt på energitab, at kabellægge en 60 kV transmissionsforbindelse frem for at føre den som luftledning. Energิตabet for forskellige kabeltyper opgøres økonomisk, og det forsøges at bestemme hvilke parametre, der påvirker størrelsen af tabet. Desuden gives et bud på den bedste kabelløsning for en given strækning med henblik på energitab i forhold til materialeomkostninger. Endeligt undersøges det hvilke andre konsekvenser, der følger med ved kabellægning af en luftledning.

Opbygning og anlæggelse af kabler & luftledninger 2

Som bekendt opstår der under transport af energi i kabler og luftledninger et energitab. Hvordan elektrisk energi transporteres i en leder fremgår af bilag B på side 79.

Forskellige parametre påvirker størrelsen af tabet, og det er derfor interessant at undersøge disse. For at klarlægge hvilke parametre der spiller ind i denne sammenhæng, ses der i dette kapitel nærmere hvordan luftledninger og kabler er opbygget.

2.1 Opbygning af luftledninger



Figur 2.1. 60 kV luftledning bestående af 3 faseledere, isolatorer, mast og jordleder som lynafleder.

I luftledninger er det hyppigst anvendte ledermateriale en kombination af aluminium og stål. Aluminium spindes omkring stålwirere, som vist i figur 2.2. Stål bruges i luftledere, da det har en højere brudstyrke end aluminium. Eksempelvis har en stålleder med tværsnitsarealet 95 mm^2 en brudstyrke på 66,5 kN, imens en lignende aluminiumsleder kun har en brudstyrke på 15,2 kN [NKT Cables, 2004].

Aluminium er dog en langt bedre leder end stål, da aluminium kun har en specifik modstand på $0,028 \mu\Omega \text{ m}$, hvorimod stål har specifik modstand på $0,105\text{--}0,24 \mu\Omega \text{ m}$. Materialeegenskaberne udnyttes i sammensætningen af en luftledning, så der opnås høj brudstyrke og god ledningsevne.

Kobber kan også anvendes i luftledninger i stedet for aluminium.

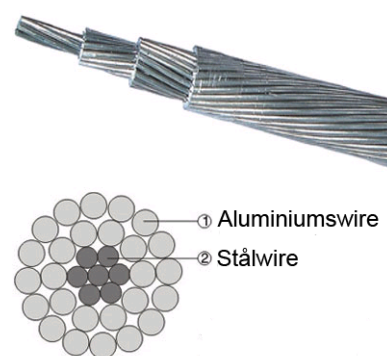
Isolatorne på masterne adskiller faselederne fra jordforbindelse. Isolatorerne er typisk fremstillet af keramisk materiale eller glas.

Luften imellem faselederne og jord fungerer som isolation og lederne er derfor ikke ydeligere isoleret. En længere afstand imellem luftleder og jord, skaber således en større isolation. Samtidig virker luften kølende på lederen, hvorfor lederens temperatur varierer med luftens. Temperaturen er desuden afhængig af belastningen.

Masterne er oftest lavet af stål, men findes også i træ og andre materialer. Designet af masterne varierer bl.a. ved forskellige spændingsniveauer. Eksempelvis anvendes høje master ved høje spændingsniveauer. I toppen af masterne hænger en jordleder, som beskytter luftledningerne imod lynnedslag.

Netselskabet Nyfors ¹ anvender hovedsageligt luftledninger med et tværsnit på 176 mm^2 på deres 60 kV net. På enkelte strækninger anvendes 70 mm^2 og 130 mm^2 .

Tekniske data på en 176 mm^2 og en 130 mm^2 luftledning kan ses i tabel 2.1. Her fremgår det, at en 176 mm^2 luftledning består af et tværsnit på 151 mm^2 aluminium og 25 mm^2 stål. Aluminiumen er sammensat af $26 \times 2,72$ tråde, imens stålet er sammensat af $7 \times 2,12$ tråde.



Figur 2.2. Eksempel på sammensætningen af stål- og aluminiumstråde i en luftledning [Dai Long Trading].

¹Nyfors er et netselskab beliggende i Nordjylland (områdenr. 032). I løbet af projektperioden har gruppen løbende haft kontakt til Nyfors, som har bidraget til rapporten bl.a. med oplysninger om deres 60 kV net.

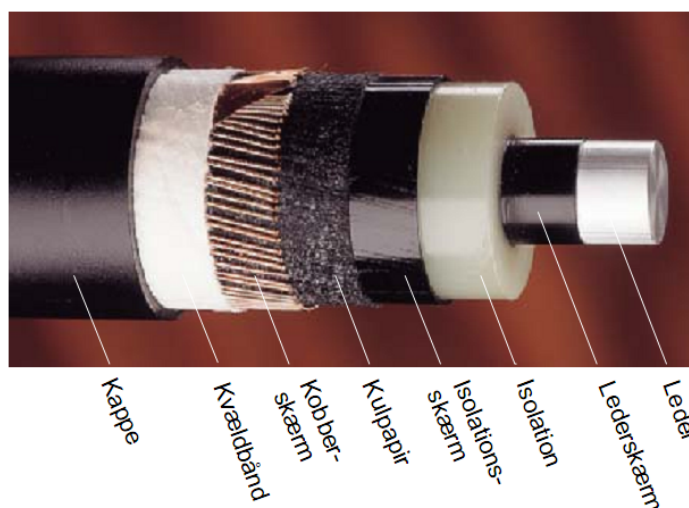
Kodenavn	Tværsnit i mm ²			Opbygning		Vægt kg/km
	Al	Stål	Kabel	Al	Stål	
QUAIL	68	11	79	6 x 3,80	1 x 3,80	275
PERNICE	112	18	130	26 x 2,34	7 x 1,82	477
OSTRICH	151	25	176	26 x 2,72	7 x 2,12	646

Tabel 2.1. Tre forskellige slags luftledninger med materiale sammensætning og vægt pr. km [NKT Cables, 1991].

2.2 Opbygning af højspændingskabler

Kabler er i modsætning til luftledninger placeret i jorden, og det er derfor nødvendigt at isolere lederen. Lederen i et kabel består af enten aluminium eller kobber, som kan være masiv eller flertrådet. Kabler er typisk opbygget som vist på figur 2.3, men ved spændingsniveauer under 30 kV anvendes i nogle tilfælde kabler med tre ledere i samme kappe.

Der er ikke en kabelstandard for 60 kV og derfor anvendes kabler med en maksimal driftsspænding på 72,5 kV. Derfor vil der i den efterfølgende del af rapporten anvendes kabeltypen PEX-M-AL-LT 72 kV fra NKT Cables til en 60 kV forbindelse.



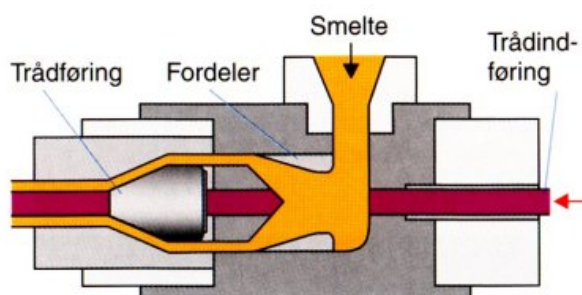
Figur 2.3. 1-leder PEX-kabel uden tværgående vandtæthed [Dansk Energi, 2006b]

Isolationen mellem leder og skærm består af PEX, som er tværbunden PE (polyethylene). Polyethylene består af lange kulstofkæder, der ikke er direkte forbundet, men derimod får deres struktur ved at være viklet ind i hinanden. Ved

opvarmning af materialet kan molekylerne bevæge sig mere frit mellem hinanden og afstanden mellem kæderne bliver længere. Dermed mister materialet noget af sin hårdhed og bliver mere elastisk.

Til forskel fra PE er PEX forbundet mellem de enkelte kulstofkæder. Denne forbindelse gør, at kulstofkæderne ikke bevæger sig i forhold til hinanden og at strukturen ikke deformerer ved temperaturstigning [PEX Association, 2009]. Maksimal driftstemperatur for PE er 70°C , mens det for PEX er 90°C . Kappen er desuden lavet af PE, da temperaturen i kappen ikke er lige så høj som i isolationen. Kappen skal beskytte kablet, mens det ligger i jorden samt ved anlæggelsen af det.

Kabler produceres ved at ekstrudere lederskærm, isolation og isolationsskærm uden på lederen. Materialerne ekstruderes i samme proces for bl.a. at undgå urenheder i kablet, da dette vil forringe kablets langtidsegenskaber. Ekstruering er en fællesbetegnelse for en kontinuerlig proces, hvor granulat smeltes i en ekstruder og under tryk presses igennem det værktøj, der er tilsluttet for enden af ekstruderen, som det fremgår i figur 2.4. Efter at materialet er blevet ekstruderet på lederen, foregår tværbindingen mellem kulstofkæderne, så PE bliver forarbejdet til PEX. Leder- og isolationsskærm er begge lavet af halvledende materialer.

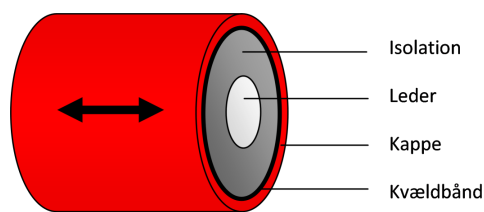


Figur 2.4. Leder der ekstruderes med et plastmateriale [Plastindustrien, 2008].

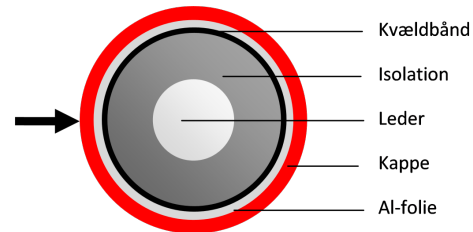
Kobberskærmen består af snoede kobbertråde med et kobberbånd, der er snoet den modsatte vej af trådene. Kobbertrådene skal kunne klare den kortslutningsstrøm der kan fremkomme i kablet, inden kablet frakobles og er derfor tilsluttet jord [Energinet.dk, 2005].

Ved beskadigelse af kabler, kan vand og urenheder indtrænge. For at undgå at vand løber indvendigt i kablet, og således ødelægger en stor del af kablet, bliver kablet gjort langsgående vandtæt i skærmområdet. Dette gøres med kvældbånd eller kvældpulver, som svulmer op, når det bliver vådt og dermed blokerer for indtrængende vand, se figur 2.5 på næste side. Hvis kablet lægges i et vådt miljø,

kan det endvidere gøres tværgående vandtæt, se figur 2.6. Dette sker da PE-kappen ikke er 100 % vandtæt og vand derfor kan difundere gennem denne.



Figur 2.5. Principskitse af et kabel med langsgående vandtæthed, hvor pilen angiver hvilken retning vand er blokeret for at brede sig i kablet.

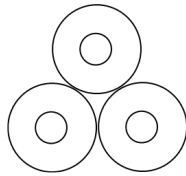


Figur 2.6. Principskitse af et kabel med langs- og tværgående vandtæthed, hvor pilen indikerer i hvilken retning der blokeres for vandindtrængning

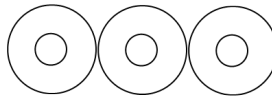
Vandtætningen udføres ved enten at laminere Alu-folie på kappen, forsyne kablet med en korrugeret Alu-skærm eller ved at beklæde kablet med en blykappe. Dansk Energi fraråder, at anvende blykappe i kabler på 60 kV nettet [Dansk Energi, 2006b]. Ved at forsyne et kabel med tværgående vandtæthed øges prisen på kablet, men kan samtidig forlænge kablets levetid. Det opgøres for den enkelte strækning hvorvidt kabel med tværgående vandtæthed er nødvendigt.

Anlæggelse af kabler

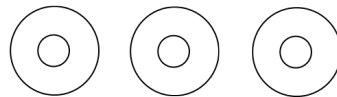
Når en 60 kV kabelforbindelse anlægges, bliver kablerne gravet ned i en dybde på ca. 1,1 m [Sørensen, 2009a]. Kablerne lægges i enten en trekantforlægning eller i plan. De forskellige forlægningstyper ses i figur 2.7 på den følgende side. Forlægningen har bl.a. indflydelse på hvordan varmen afgives fra kablerne, samt hvordan reaktansen ændrer sig. Dette beskæftiger vi os dog ikke yderligere med. På 60 kV niveau lægges kablerne i en trekantforlægning og på højere niveau lægges de som regel i plan [Nærføringsudvalget, 2006].



Tæt trekantforlægning



Lagt i tætplan



Lagt i plan med afstand

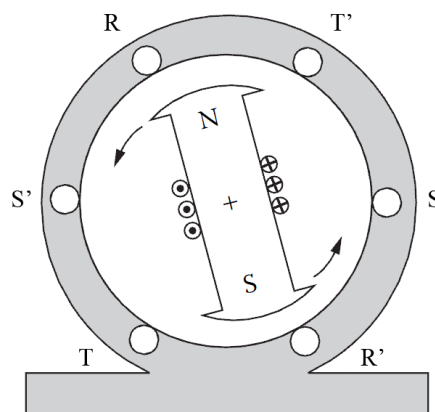
Figur 2.7. Skitse af de forskellige måder hvorpå kablerne anlægges i jorden.

Teoretisk grundlag for tabsberegning 3

Dette afsnit omhandler den teori, der er nødvendig for at bestemme effekttabet i en given AC-leder. Der fokuseres hovedsageligt på bestemmelse af elektrisk modstand og effekt, med henblik på bestemmelse af energitabet til omgivelserne i en given transmissionleder ved en given last.

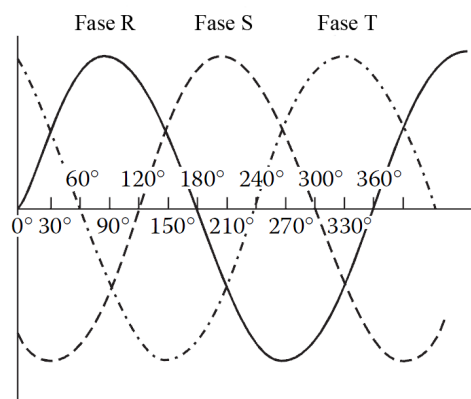
3.1 3-faset vekselstrøm

I elnettet anvendes 3-fasesystemet. Her genereres strømmen i en generator med tre viklinger. De tre viklinger er monteret i generatorens faststående del, kaldet statorhuset, og er forskudt 120° i forhold til hinanden. Et simpelt billede af generatoren er vist i figur 3.1, hvor R, S og T er generatorens tre viklinger.



Figur 3.1. Illustration af en simpel 3-faset generator, hvor R, S og T er viklingernes begyndelse, og R', S' og T' er viklingernes slutning [Whitaker, 2007].

I en generator med en roterende topolet rotor, som vist i figur 3.1, vil der blive induceret sinusformede spændinger i de tre viklinger. Grafisk afbildning af generatorens tre faser kan ses i figur 3.2, hvor det demonstreres, at faserne er forskudt $1/3$ periode fra hinanden [Larsen, 2006].



Figur 3.2. Grafisk afbildning af 3-faset vekselstrøm. [Whitaker, 2007].

3.2 Vekselstrøm og -spænding

Strøm

Elektrisk strøm i er en bevægelse af frie elektroner, altså negative enhedsladninger. Strømmens positive retning er fastsat modsat elektronretningen. Strømstyrken måles i ampere, der defineres som ladning pr. tid

Hvis et elektrisk netværk påtrykkes en AC spænding på sinusform, vil der fremkomme en strøm, som generelt kan beskrives ved

$$i(t) = I \sin(\omega t + \Theta) \quad (3.1)$$

hvor $i(t)$ udtrykker strøm som funktion af tiden, I er strømmens maksimumværdi, t er tidsperioden, ω er vinkelfrekvensen og Θ er fasevinklen, hvor sinussvingningen har gennemløbet vinklen Θ til $t = 0$.

Vinkelfrekvensen ω udtrykkes ved

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (3.2)$$

Hvor f er frekvensen af spændingskilden, og T er periodetiden.

Af praktiske hensyn er det bejligt at regne på såkaldte effektivværdier, også kaldet rms-værdier. Dels fordi det er den værdi, som diverse måleapparater angiver, og dels fordi mange DC udtryk også er gældende for rms-værdier. Rms strømmen udtrykkes som

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

hvor I_{max} er strømmens maksimumsværdi.

Spænding

Elektrisk spænding er et udtryk for den elektriske potentialforskel. Ved to elektriske potentialer, V_A og V_B , kan potentialforskellen udtrykkes ved

$$U = V_B - V_A \quad (3.4)$$

Potentialforskellen U måles i volt, som er defineret ved $\frac{J}{C}$.

Vekselspændingskilder, der producerer sinusformede spændinger, kan generelt beskrives ved funktionsudtrykket

$$u(t) = U \sin(\omega t + \theta) \quad (3.5)$$

hvor $u(t)$ udtrykker spænding som funktion af tiden, U er spændingens maksimumsværdi, ω er vinkelfrekvensen, hvorved spændingen produceres, og θ er spændingens fasevinkel, hvor sinussvingningen har gennemløbet vinklen θ til $t = 0$ [Jewett/Serway, 2008].

Rms-værdien for AC spænding, udtrykkes på samme måde som I_{rms} , ved

$$U_{rms} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad (3.6)$$

3.3 Elektrisk modstand

Elektrisk modstand er et udtryk for en leders modstand mod at blive gennemløbet af en elektrisk strøm. Lederens elektriske modstand R , også kaldet resistans, er lig forholdet imellem spændingen U over lederen og strømmen I igennem denne.

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.7)$$

Dette udtryk er kendt som Ohms lov og forudsætter at lederen er rent resistiv, hvilket vil sige at der *ikke* indgår komponenter, der faseforskyder strøm og spænding.

I en ensartet leder er modstanden R afhængig af tre ting

- Lederens længde
- Lederens tværsnit
- Den specifikke modstand ρ for materialet

Modstanden R kan udtrykkes ved

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (3.8)$$

hvor ρ er den specifikke modstand også kaldt resistiviteten, A er lederens tværsnit og l er lederens længde.

Den specifikke modstand ρ er temperaturafhængig. I de fleste materialer varierer ρ ganske meget med temperaturen. Af den grund oplyses ρ altid sammen med en temperaturkoefficient α , samt ved hvilken temperatur en given ρ er gældende. I mange tilfælde kan det antages at ρ udvikler sig lineært, der dog er en tilnærmelse, men gældende indenfor forholdsvis små temperaturafvigelser fra hvor ρ er målt.

Både ρ og α er temperaturafhængige. Hvordan disse regnes uden lineær sammenhæng med temperaturen, ses der bort fra i denne sammenhæng.

I tabellen herunder fremgår udvalgte ledes specifikke modstand, temperaturkoefficient og deres densitet, ved 20 °C.

Materiale	Resistivitet ρ_{20} $\mu\Omega\text{m}$	Temperaturkoefficient $\alpha_{20} \cdot 10^3$ K^{-1}	Densitet ρ t/m^3
Sølv	0,0159	4,1	10,5
Kobber	0,01725	3,93	8,89
Aluminium, hårdt	0,0284	4,03	2,7
Jern	0,0978	6,4	7,8 - 7,9
Stål	0,105-0,24	5,6-3,2	7,8-7,9
Zink	0,059	4	7,14
Guld	0,024	3,4	19,3
Bly	0,2	4	11,34

Tabel 3.1. Specifik modstand, temperaturkoefficient og densitet for udvalgte metaller [Andersen, 2003].

Den reciproke værdi til modstanden R , kaldes lederens *ledningsevne* eller *konduktans* og udtrykkes ved

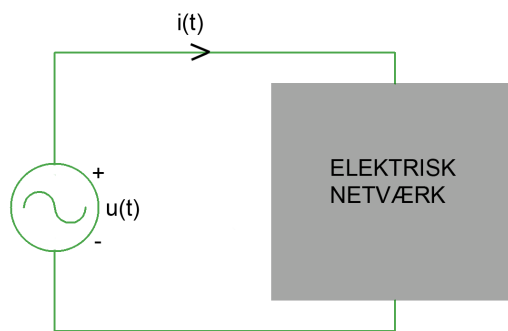
$$G = \frac{\sigma A}{l} \quad (3.9)$$

Hvor σ er lederens specifikke ledningsevne (konduktivitet), der er det reciproke til størrelsen ρ .

3.4 Komplekse spændingskilder

Vekselspændingskilder, der producerer sinusformede spændinger, kan generelt beskrives ved funktionsudtrykket

$$u(t) = U \sin(\omega t + \theta)$$



Figur 3.3. Elektrisk to-terminal netværk.

Hvis et elektrisk netværk¹, som illustreret i figur 3.3, påtrykkes en spænding af denne form, vil der fremkomme en strøm, som generelt kan beskrives ved funktionsudtrykket

$$i(t) = I \sin(\omega t + \Theta)$$

Hvis nu den komplekse spændingskilde $u_c(t) = Ue^{j(\omega t + \theta)}$ betragtes istedet, så ses følgende

$$u_c(t) = Ue^{j(\omega t + \theta)} = U \cos(\omega t + \theta) + jU \sin(\omega t + \theta)$$

¹Lineært elektrisk netværk forudsættes [Irwin, 2002].

Her er $u(t)$ altså blot den imaginære del af $u_c(t)$

$$u(t) = \text{Im}(u_c(t)) = \text{Im}(Ue^{j(\omega t + \theta)})$$

Påtrykkes netværket istedet spændingen $u_c(t)$, vil der fremkomme en kompleks strøm $i_c(t)$ af formen

$$i_c(t) = Ie^{j(\omega t + \Theta)} = I \cos(\omega t + \Theta) + jI \sin(\omega t + \Theta)$$

Ligeledes gælder det, at $i(t)$ her blot er den imaginære del af $i_c(t)$

$$i(t) = \text{Im}(i_c(t)) = \text{Im}(Ie^{j(\omega t + \Theta)})$$

De fysiske størrelser, som er udtrykt ved $u(t)$ og $i(t)$, er således stadig medtaget ved beregning med komplekse spændingskilder. De er blot udtrykt på anden form som konsekvens af beregning med komplekse størrelser.

$u_c(t)$ kan med fordel omskrives til

$$u_c(t) = Ue^{j(\omega t + \theta)} = Ue^{j\theta}e^{j\omega t} = \mathbf{U}e^{j\omega t}, \quad \mathbf{U} = Ue^{j\theta} = U\angle\theta$$

Hvilket gælder ligeledes for $i_c(t)$

$$i_c(t) = Ie^{j(\omega t + \Theta)} = Ie^{j\Theta}e^{j\omega t} = \mathbf{I}e^{j\omega t}, \quad \mathbf{I} = Ie^{j\Theta} = I\angle\Theta$$

$\mathbf{U}$ og $\mathbf{I}$ kaldes *visere* og udtrykker maksimumværdi og fasevinkel for hhv. $u(t)$ og $i(t)$, hvilket karakteriserer størrelserne i kraft af, at de har samme vinkelfrekvens.

Hvis netværket i figur 3.3 på forrige side kun består af en enkelt modstand med resistansen R , fås følgende sammenhæng mellem $u(t)$ og $i(t)$, jf. Kirchhoffs spændingslov

$$u(t) = Ri(t) \Rightarrow U \sin(\omega t + \theta) = RI \sin(\omega t + \Theta)$$

For sammenhængen mellem $u_c(t)$ og $i_c(t)$ gælder det ligeledes

$$u_c(t) = Ri_c(t) \Rightarrow \mathbf{U}e^{j\omega t} = R\mathbf{I}e^{j\omega t} \Rightarrow \mathbf{U} = R\mathbf{I}$$

Hvilket resulterer i et reduceret udtryk for sammenhængen mellem $\mathbf{U}$ og $\mathbf{I}$. Generelt kan dette resultat udvides til at omfatte andre elektriske komponenter, som f.eks.

spoler og kondensatorer, men dette ligger udenfor denne rapports udstrækning. Det vil blot bemærkes her, at generelt kan visersammenhæng udledes, der direkte korresponderer til tilsvarende sammenhæng for jævnstrømskredsløb. Eksempelvis kan Kirchhoffs spænding- og strømlov direkte overføres til visersammenhæng.

3.5 Impedans

Modstanden i et AC kredsløb er ikke kun resistiv, men består også af en reaktans. Dette kaldes under ét for impedansen, der betegnes med Z og defineres som

$$Z = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}} \quad (3.10)$$

Den resistive del af impedansen benævnes R og reaktansen X . Heraf formen

$$Z = R + jX \quad (3.11)$$

Z er et komplekst tal og størrelsen af Z udtrykkes derfor ved

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.12)$$

Hvor R er den reelle modstand, X_L den induktive reaktans og X_C den kapacitive reaktans.

Den induktive reaktans beregnes med formen

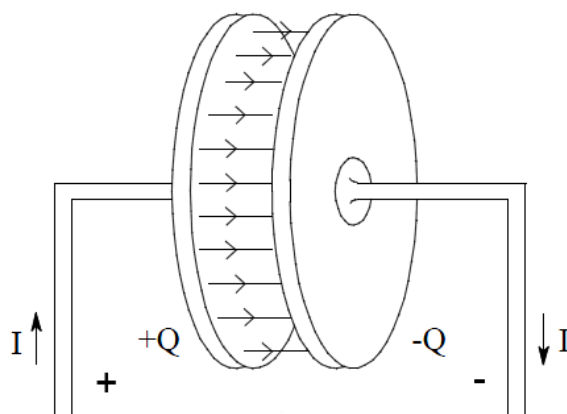
$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (3.13)$$

Den induktive reaktans opstår fordi, der er en spole i kredsløbet. I et AC kredsløb kun bestående af en spole, vil spændingen, som i figur 3.5 på næste side, være 90° foran strømmen [Jewett/Serway, 2008].

Den kapacitive reaktans beregnes med formen

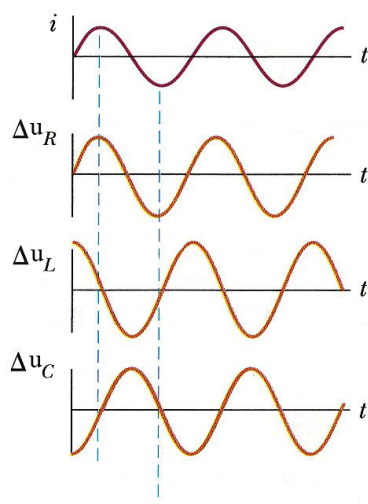
$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.14)$$

Den kapacitive reaktans opstår fordi, der er en kondensator i kredsløbet. En kondensator består af to plader der er tilsluttet hver sin terminal på en spændingskilde, se figur 3.4 på den følgende side. Når der tændes for spændingskilden, vil der på den plade, der er tilsluttet den negative terminal, blive flyttet elektroner fra spændingskilden til pladen. På den plade der tilsluttet den positive terminal, vil der blive flyttet elektroner fra pladen til spændingskilden.



Figur 3.4. Kondensator med parallelle plader [Institute of Energy Technology - Aalborg University].

I et kredsløb kun bestående af en kondensator, vil der løbe en uendelig stor strøm i starten, som vil aftage med tiden, indtil spændingsforskellen mellem pladen og dens tilhørende terminal er nul. I et AC kredsløb kun bestående af en kondensator vil spændingen, som i figur 3.5, være forskudt 90° bagud i forhold til strømmen.

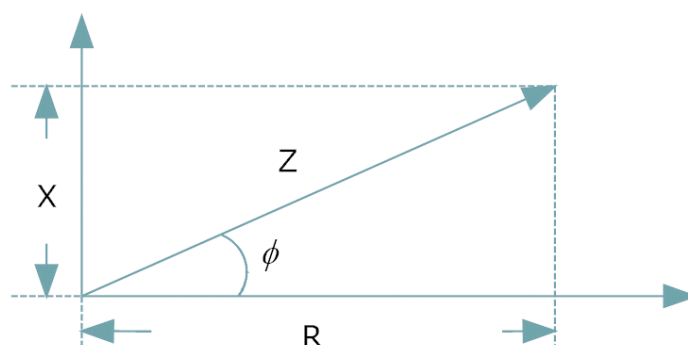


Figur 3.5. Grafen viser faseforholdene for varierende spændinger i et RLC kredsløb. Det ses at spændingen over en modstand R er i fase med strømmen igennem den. Derimod er spændingen over en spole forskudt 90° foran strømmen, hvorimod spændingen over kondensatoren er forskudt 90° efter strømmen [Jewett/Serway, 2008].

Som der fremgår af ligning 3.12 på forrige side, så ophæver de kapacitive og de induktive reaktanser hinanden. Når $X_L = X_C$ er reaktansen nul og

impedansen i kredsløbet derfor udelukkende resistiv, og strøm og spænding vil være i fase. Dette fænomen kaldes resonans, og frekvensen hvorved dette sker kaldes resonansfrekvensen.

Z kan også beskrives med et Argand diagram. Reaktansen X er den resulterende af $X_L - X_C$, og tegnes på den lodrette akse. Er X negativ, er reaktansen derfor overvejende kapacitiv, og omvendt er X positiv, er reaktansen overvejende induktiv. Resistansen R tegnes ud af den vandrette akse. Tilsammen udgør den resistive og reaktive del impedansen Z , der danner vinklen ϕ med den reelle akse, som vist i figur 3.6.



Figur 3.6. Argand diagram. Reaktansen X tegnes på den lodrette akse, Resistansen R hen af den vandrette akse. Tilsammen udgør den resistive og reaktive del impedansen Z .

Vinklen ϕ i figur 3.6 udtrykkes ved

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right) \quad (3.15)$$

Fortegnet af ϕ viser om reaktansen er overvejende kapacitiv eller induktiv.

Vinklen ϕ kaldes også for faseforskydelsen. At ϕ imellem strøm og spænding er den samme vinkel, som knytter sig til Z , er nemt at se på polær form.

$$Z = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}} = \frac{|U|\angle v_1}{|I|\angle v_2} = \frac{|U|}{|I|} \angle (v_1 - v_2) \quad (3.16)$$

3.6 Effekt

Den elektriske effekt P er et udtryk for den tilførte energi pr. tidsenhed.

Effekten kan som produktet af strøm og spænding (Joules lov)

$$P = U I \quad (3.17)$$

Effekten P kan jf. 3.7 på side 21 ved rent resistive kredse uden faseforskydning af strøm og spænding udtrykkes som

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (3.18)$$

I en kreds bestående af komponenter, som faseforskyder strøm og spænding kan den aktive effekt P udtrykkes som

$$P = U_{rms} I_{rms} \cos(\theta - \Theta) \quad (3.19)$$

Hvor Θ og θ er fasevinkel for henholdsvis strøm og spænding. U_{rms} bestemmes ved ligning 3.6 på side 21 og I_{rms} ved ligning 3.3 på side 21.

3.6.1 Effektfaktor

Effektfaktoren er et udtryk for en enheds evne til at udnytte den tilførte effekt. Effektfaktoren λ udtrykkes ved

$$\lambda = \cos(\phi),$$

hvor ϕ er faseforskydningsvinklen imellem spændingens fasevinkel θ og strømmens fasevinkel Θ , altså

$$\phi = \theta - \Theta$$

Effektfaktoren udtrykkes normalt som procentdel af den tilførte effekt, eller som forholdet imellem den reelle effekt og tilsyneladende effekt [Whitaker, 2007]. Relativ og tilsyneladende effekt vil ikke blive behandlet yderligere.

Da $\phi = \theta - \Theta$ og $\lambda = \cos(\phi)$, så kan den aktive effekt P fra ligning 3.19 udtrykkes som

$$P = U_{rms} I_{rms} \lambda \quad (3.20)$$

3.7 Strømfortrængning

I en leder fremstillet af et vilkårligt materiale, der leder en vekselstrøm, kan strømmen have en tendens til at søge ud mod lederens overflade og derved ikke fordele sig jævnt i lederen. Dette fænomen kaldes strømfortrængning eller skin effect, og er afhængig af spændingsniveau, frekvens og ledertværsnit. Eksempelvis vil der opstå strømfortrængning i en leder med høj frekvens og stort tværsnit.

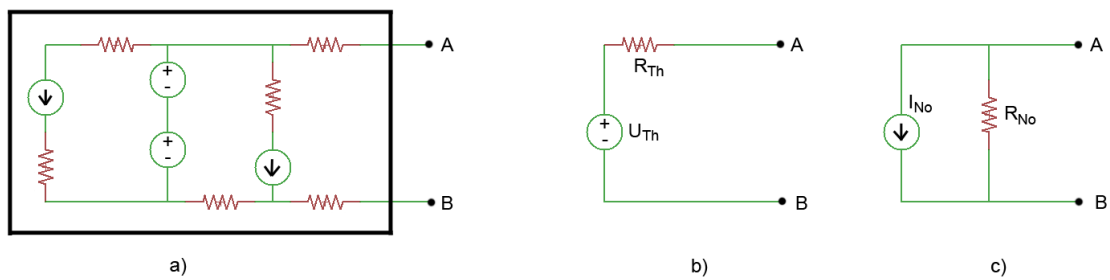
Selv ved en netfrekvens på 50 Hz, kan strømfortrængning opstå og derfor fremstilles ledere med et stort tværsnit typisk af flere metal tråde, der flettes på en sådan måde, at trådene passerer lederens midte og overflade [Gudmundsdottir, 2009].

I den kommende del af rapporten fokuseres der ikke yderligere på strømfortrængning, og derfor kan det evt. opstå som fejlkilde.

3.8 Kredsløbsreduktion

Ved modelleringer af elektriske kredsløb er det ofte en fordel at simplificere disse mest muligt. Thévenin's sætning siger, at enhver kombination af spændingskilder, strømkilder og modstande i et lineært kredsløb, kan repræsenteres af én ækvivalent spændingskilde U_{Th} og én ækvivalent modstand R_{Th} i serie.

Derudover siger Mayer-Nortons sætning ligeledes at enhver kombination af spændingskilder, strømkilder og modstande i et lineært kredsløb, kan repræsenteres af én ækvivalent strømkilde I_{No} i parallel med én ækvivalent modstand R_{No} . Sætningerne er formuleret for DC-kredsløb, men er gældende for AC-kredsløb, hvor impedanser indgår istedet. Figur 3.7 herunder viser hhv. det Thevenin-ækvivalente og det Norton-ækvivalente kredsløb til et elektrisk netværk af spændingskilder, strømkilder og modstande.



Figur 3.7. a) Elektrisk netværk, der repræsenterer enhver kombination af spændingkilder, strømkilder og modstande i et lineært kredsløb. b) Thévenin-ækvivalente kredsløb. c) Norton-ækvivalente kredsløb.

I denne rapport vil beregninger på hhv. Thévenin- og Norton-ækvivalente kredsløb ikke blive behandlet yderligere, men blot notere at det er muligt at foretage kredsløbsreduktioner [Johnson et al., 1997].

3.9 Forsøgsrække

I dette afsnit gennemgås to forsøg. Det første omhandler *impedans*, det andet *effekt*. Formålet med forsøgene er, at eftervise de formler, der ligger til grund for modellering af effektab. Derudover skal forsøgene give en bedre forståelse for teorien bag formlerne.

3.9.1 Måling af impedans

Formål

Formålet med dette forsøg er, at bekræfte sammenhængen mellem U , I , Z og fasevinklen ϕ .

Apparaturliste

Navn	Mærke og model	AAU nr.
Tonegenerator	GW Instek GFG 8020H	79085
Oscilloskop	Hameg HM 208	30000
2 stk prober		EGI-lab
Analogt multimeter (1)	Goerz Unigor 3s Type 226213	EGI-lab
Analogt multimeter (2)	Elima Elavi 3 Type 226213	EGI-lab
Digitalt multimeter	CIE 125	66440
Dekademodstand	Danbridge Type DR 4/ABCD	Fysiklab
Spole	470 μH	

Teori

Den samlede impedans for kredsløbet kan bestemmes ved følgende udtryk.

$$Z = \frac{U}{I}$$

Impedansen kan også beregnes ved følgende udtryk, som beskrevet i formel 3.12 på side 25:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Hvor R er modstanden, mens X_L og X_C er hhv. den induktive reaktans og den kapacitive reaktans.

Den induktive reaktans X_L kan bestemmes med følgende udtryk, beskrevet i formel 3.13

$$X_L = 2\pi fL$$

Den kapacitive reaktans X_C kan bestemmes ved følgende udtryk, beskrevet i formel 3.14

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

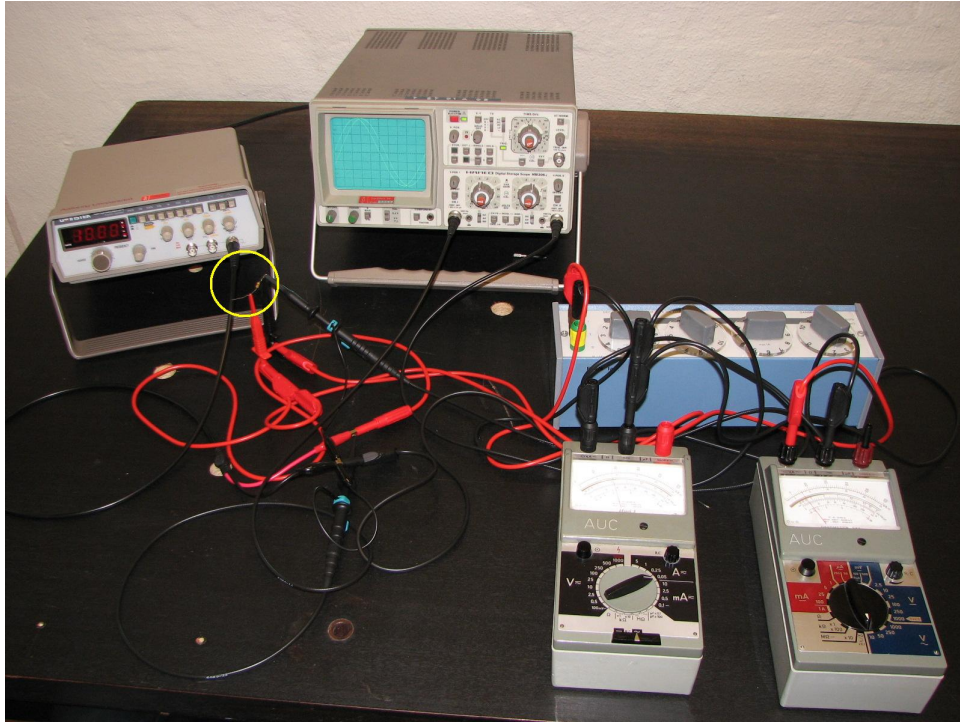
Som det også fremgår, er både X_L og X_C afhængige af frekvensen og af hhv. induktansen L og kapacitansen C .

Faseforskydelsen mellem strøm og spænding kan bestemmes som i formel 3.15 hvoraf det fremgår at vinklen afhænger af reaktansen X og den reelle modstand R .

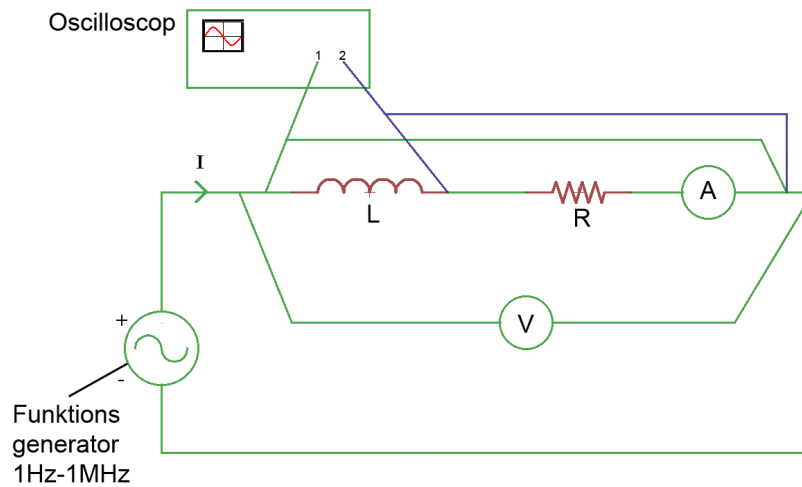
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right)$$

Forsøgsbeskrivelse

Analog multimeter nr. 1 anvendes som amperemeter og nr. 2 anvendes som voltmeter. Det digitale multimeter anvendes som ohmmeter. I forsøget anvendes en spole med en induktans på $470 \mu\text{H}$, hvor strømmen igennem komponenten maksimalt må være 30 mA. Den samlede reelle modstand R , er bestemt til at være $63,3 \Omega$, for ikke at overskride den maksimale strøm. De $63,3 \Omega$ består af modstanden i spolen på $35,05 \Omega$, modstanden i amperemetret på $6,05 \Omega$, samt modstanden fra dekademodstanden på $22,2 \Omega$. Da disse forskellige modstande er koblet i serie er den samlede modstand bestemt ved summen af disse [Jewett/Serway, 2008]. Figur 3.8 på næste side viser forsøgsopstillingen.



Figur 3.8. Foto af forsøgsopstillingen. Den gule cirkel illustrerer spolens placering

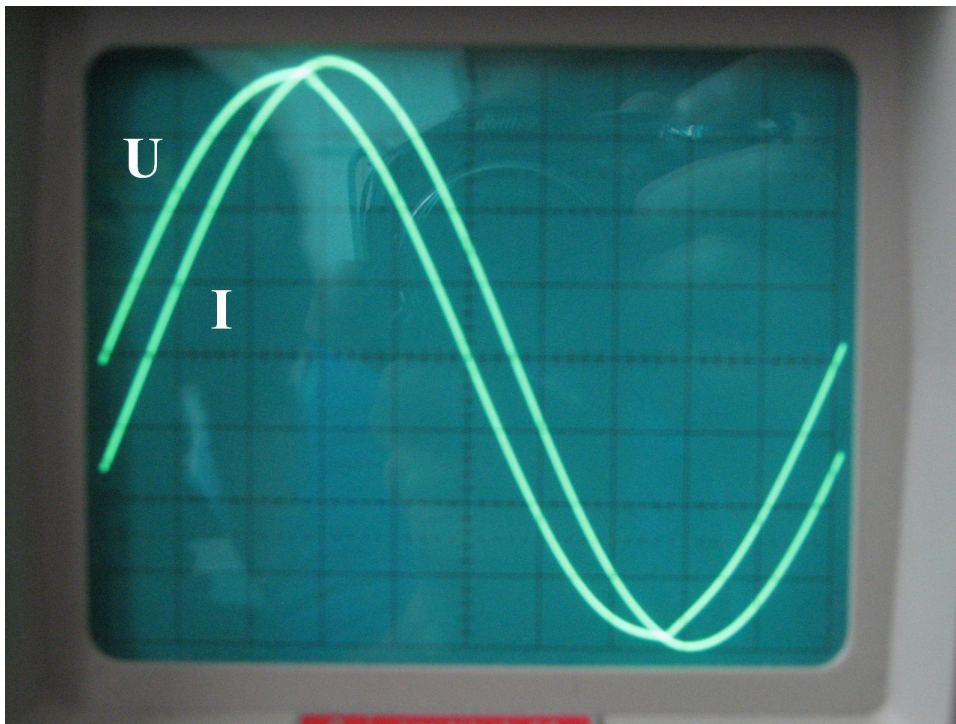


Figur 3.9. Diagram over forsøgsopstillingen. Voltmetret er placeret således at spændingen måles over modstanden i hhv. spole, dekademodstand og amperemeter, som er seriekoblet. På oscilloskoppets kanal 2 måles spænding over en resistiv kreds, hvorfor strøm og spænding er i fase. Kanal 2 udgør derfor reference-spændingen. På oscilloskopets kanal 1 måles spændingen over hele kredsen, hvorved spændingen forskydes i forhold til strømmen pga. spolen.

Under forsøget ændres frekvensen fra 5 til 25 kHz. Dette bevirker at den induktive

reaktans i spolen forøges. Måling af strøm, spænding og faseforskyldelse er foretaget med et interval på 1 kHz. Figur 3.10 viser hvordan strøm og spænding er forskudt. Figuren afspejler en faseforskyldelse på ca. 25° . Figuren viser U spændingskurven over hele kredsen, som forskydes af reaktansen. I repræsenterer, i figuren, spændingskurven over den rent resistive del af kredsen. Da strøm og spænding her er i fase repræsenterer referencespændingens skærring med x-aksen, samtidig strømmens skærring med x-aksen. Faseforskyldelsen blev bestemt i procent for en periode på oscilloskopet, hvorefter denne deles ud på i alt 360° svarende til 1 periode. Et tern svarer altså til 36° .

Forestilles forsøget som værende et kabel under drift, tilsluttet en last, vil der være en impedans både i kablet og i lasten. Kablet modelleres med en impedans bestående af en reel modstand R og en induktiv reaktans X_L . Lasten modelleres ligeledes med en reel modstand R og en induktiv reaktans. Disse impedanser er repræsenteret med hver en spole og en modstand koblet i serie og kan derfor regnes som én samlet hhv. modstand og spole, som i dette forsøg.



Figur 3.10. Viser hvordan strøm og spænding er forskudt i kredsen. Vinklen imellem strøm og spænding betegnes ϕ og varierer i forsøget med reaktansen (da R er konstant). U viser spændingskurven over hele kredsen, mens I repræsenterer spændingskurven over den rent resistive del af kredsen. Da strøm og spænding her er i fase repræsenterer spændingens skærring med x-aksen samtidig strømmens skærring med x-aksen.

Modstanden R er under forsøget konstant, da modstanden ikke afhænger af frekvensen. Den induktive reaktans X_L vil derimod variere med frekvensen. Forsøgsopstillingen er et RL kredsløb, hvorfor den capacitive reaktans X_C ikke indgår i kredsen. Dermed ses bort fra denne, hvormed reaktansen bestemmes udelukkende af den induktive reaktans.

Måleresultater og databehandling

For at eftervise udtrykket $Z = U/I$, beregnes impedansen ved hjælp af de målte værdier for strøm og spænding ved frekvensen gående fra 5-25 kHz. De målte impedanser kaldes Z_1 . Disse sammenholdes med beregnede impedanser, kaldet Z_2 , efter formlen $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, hvor X_C som bekendt er 0. X_L beregnes derimod ved den kendte induktans (470 μH) og den kendte frekvens. De målte impedanser og de beregnede impedanser sammenholdes i figur 3.11 på næste side.

Eksempel på beregning af impedans(Z_1) for målt spænding og strøm ved en givet frekvens.

$$I = 255 \text{ mA}$$

$$U = 1,68 \text{ V}$$

$$f = 5,00 \text{ kHz}$$

$$Z_1 = \frac{U}{I} = \frac{1,68 \text{ V}}{255 \text{ mA}} = 65,9 \Omega$$

Eksempel på beregning af impedans(Z_2) ved kendt modstand og reaktans ved en givet frekvens.

$$L = 470 \mu\text{H}$$

$$R = 63,3 \Omega$$

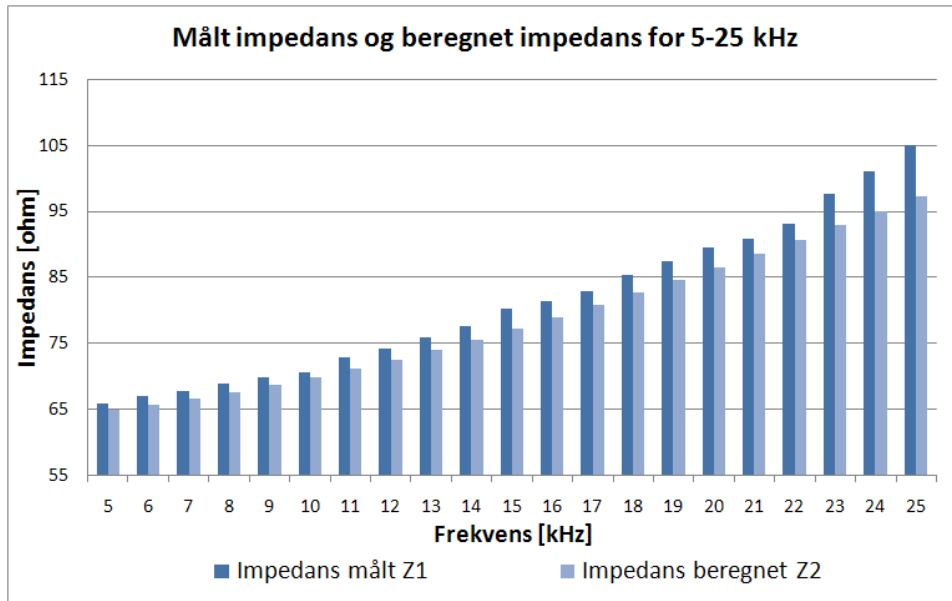
$$f = 5,00 \text{ kHz}$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 470 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 14,8 \Omega$$

$$Z_2 = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(63,3 \Omega)^2 + (14,8 \Omega - 0)^2} = 65,9 \Omega$$

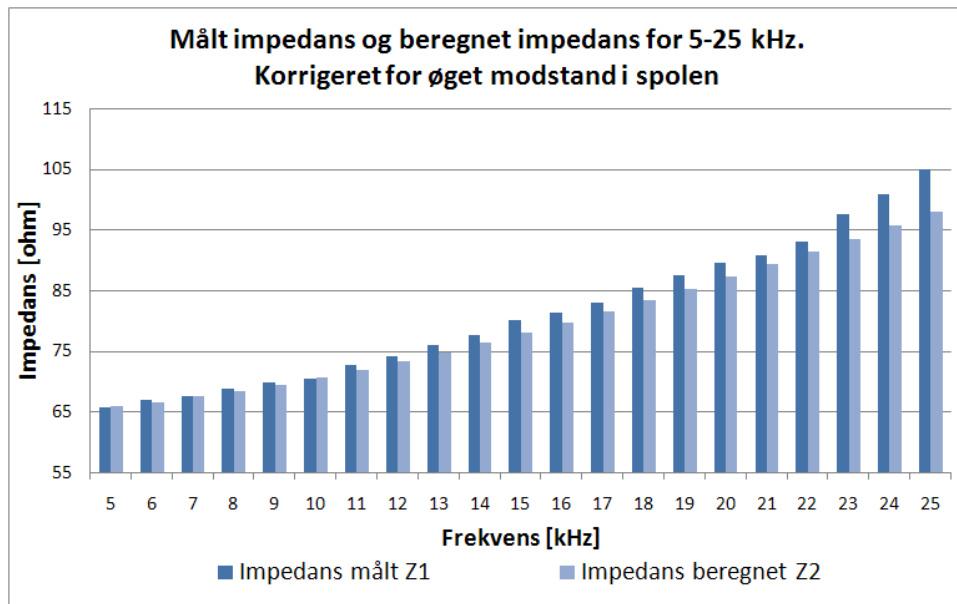
For frekvensen 5,00 kHz er Z_1 65,9 Ω , mens Z_2 er 65,0 Ω . Dette skaber en differens på 0,9 Ω . Figur 3.11 på den følgende side viser et søjlediagram for hhv. Z_1 og Z_2 ved forskellige frekvenser. Som det kan ses stemmer impedanserne næsten overens. Generelt kan det dog siges, Z_1 er højere end Z_2 . Specielt ved frekvenser fra ca. 15

kHz til 25 kHz afviger Z_1 fra Z_2 og tendensen afspejler, at Z_1 er voksende i forhold til Z_2 .



Figur 3.11. Her ses impedansudviklingen i forhold til frekvensen. De mørkeblå søjler viser Z_1 og de lyseblå søjler Z_2

Efter forsøget var afsluttet, blev modstanden i spolen målt igen, hvorefter denne havde ændret sig fra 35,05 Ω til 36,00 Ω . Dette skyldes sandsynligvis en temperaturstigning i komponenten, som følge af den afsatte effekt. Figur 3.12 på næste side viser en korrigeret Z_2 beregnet ved en modstand på 36 Ω i spolen, holdt op imod Z_1 . Derved er den samlede modstand i kredsen 64,3 Ω . Resultatet viser at Z_1 ved frekvenser fra 5 kHz til 10 kHz næsten stemmer overens med Z_2 . Tendensen ved højere frekvenser er dog stadig at den Z_1 stiger i forhold til den Z_2 . Årsager hertil forklares nærmere i afsnittet om fejlkilder.



Figur 3.12. Her ses impedansudviklingen i forhold til frekvensen. I dette søjlediagram er der taget højde for, at modstanden i spolen bliver højere ved belastning. De mørkeblå søjler viser Z_1 og de lyseblå søjler viser Z_2 korrigeret.

Udtrykket $\phi = \tan^{-1}(X/R)$ ønskes eftervist. Dette gøres ved at sammenligne den målte faseforskydelse ϕ_1 , med den beregnede faseforskydelse kaldt ϕ_2 . Sammenligningen foretages igen i intervallet 5 kHz - 25 kHz, hvor der er foretaget måling og beregning for hver 1 kHz.

Eksempel på beregning af faseforskydelsen (ϕ_2) mellem strøm og spænding for kendt modstand og reaktans ved en givet frekvens.

$$L = 470 \mu\text{H}$$

$$R = 63,3 \Omega$$

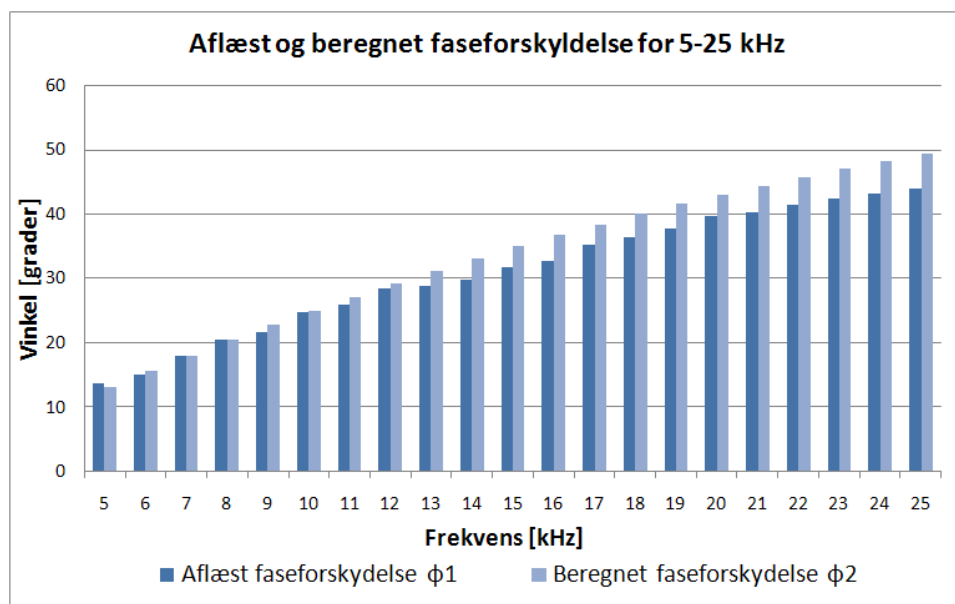
$$f = 10,00 \text{ kHz}$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 10,00 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 470 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 29,5 \Omega$$

$$X = X_L - X_C = 29,5 - 0 = 29,5 \Omega$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{29,5 \Omega}{63,3 \Omega}\right) = 25,0^\circ$$

For frekvensen 10 kHz er ϕ_1 24,8°, mens ϕ_2 er 25,0°. En afvigelse på 0,2°. Figur 3.13 viser ϕ_1 i forhold til ϕ_2 . I intervallet 5 kHz - 10 kHz stemmer faseforskydelserne næsten overens. For højere frekvenser end 10 kHz begynder afvigelserne at indtræde hvor ϕ_2 er større end ϕ_1 . Tendensen er at ϕ_2 stiger kraftigere end ϕ_1 når frekvensen øges.



Figur 3.13. Her ses faseforskyldelsen i forhold til frekvensen. De mørkeblå søjler afspejler den målte faseforskyldelse, mens de lyseblå søjler viser de beregnede vinkler

Fejlkilder

I resultaterne fra forsøget er der ikke helt overensstemmelse mellem Z_1 (ved måling af U og I) og den Z_2 (udtrykt vha frekvensen og resistansen). Derudover er der også en lille uoverensstemmelse mellem den beregnede faseforskyldelse og den målte faseforskyldelse. Derfor beskrives i dette afsnit hvilke faktorer, der kan have haft indflydelse på resultaterne. Derudover overvejes betydningen af disse, samt i hvilken retning de måtte påvirke resultaterne.

- Temperaturstigning i kredsen.

Som det fremgår af databehandlingen steg spolens egenmodstand med 0,95 Ω . Dette skyldes formegentligt en temperaturstigning, som følge af den afsatte effekt.

En stigning i kredsens samlede modstand, R , vil resultere i aflæsning af en mindre vinkel imellem kurverne for I og U på oscilloskopet. Derudover vil en

højere modstand påvirke Z_2 , så værdien af denne bliver større, hvilket fremgår af den korrigerede graf. Målinger af den sande modstand i kredsen på hvert frekvens-niveau kan foretages for at mindske denne fejlkilde. I dette forsøg blev modstanden i spole kun målt før og efter forsøget, til hhv. $35,05 \Omega$ før og $36,00 \Omega$ efter. Den samlede reelle modstand blev kun målt inden forsøget, så evt. ændringer i resten af kredsen er ikke kendte.

- Rent resistiv kreds, ikke rent resistiv.

De analoge multimetre er begge opbygget som en drejespole m. ensretter. Dette gør, sammen med dekademodstandens opbygning, at der i den del af kredsen der anvendes som rent resistiv, også er en induktiv reaktans. Da den induktive reaktans er frekvensafhængig, kan en ellers ringe induktans blive betydelig ved høje frekvenser, som anvendt i forsøget. Dette har indflydelse på den, på oscilloskopet, aflæste vinkel mellem strøm og spænding, der derved bliver mindre. Om multimetret og dekademodstanden har en betydelig induktiv reaktans blev undersøgt. Dette skete ved en forsøgsopstilling bestående udelukkende af dekademodstanden, amperemetret og voltmetret. I og U blev aflæst ved en række forskellige frekvenser mellem 5 - 25 kHz. Resultatet blev, at der ved 25 kHz var en knap 2Ω større impedans end ved 5 kHz. Resultatet er dog ikke, nok til at forklare afvigelsen på Z_1 og Z_2 i figur 3.12, men udgør en del af uoverenstemmelsen.

- Aflæsning af oscilloskopet.

Aflæsning af vinklen mellem de to kurver på oscilloskopet, skete ved at indstille billedet til én periode af den ene kurve. Afstanden i procent imellem kurverne divideret med 360° er derved vinklen ϕ . For at opnå en nøjagtig aflæsning af vinklerne, blev kurverne instillet så de skar x-aksen så lodret som muligt. Optimering aflæsningsnøjagtigheden, kan ske ved indstille oscilloskopet til *kalibreret* og derefter justere TIME/DIV så de to kurvers skæring med x-aksen fylder mest muligt på skærmen. Herefter kan tiden mellem de to kurver aflæses med høj nøjagtighed. Vinklen fås så ved at gange med vinkelhastigheden ω og efterfølgende med $180/\pi$ for at få resultatet i grader.

- Aflæsning af analoge multimetre.

Ved anvendelse af analoge multimetre skal det tilstræbes, at aflæsningerne sker i den høje ende af måleskalaen. Korrekt aflæsning sker ved at anvende spejlet på måleskalaen, så der kun er én viser synlig. I forsøget blev amperemetret indstillet til at måle maks. 50 mA og voltmetret maks 2,5 volt. Dette resulter-

rede i aflæsninger ca. midt på måleskalaen. Samtidigt blev der registreret et ringe udsving ved frekvensændring. Disse to ting repræsenterer en unøjagtighed i resultaterne. Dette kan der kompenseres for ved enten at anvende andre multimetre, eller anvende en anden spole med højere tilladelig maks. strøm, samt hæve strømmen og spændingen for kredsen.

- Måleafvigelse ved høje frekvenser.

Multimetrenes måleafvigelse er angivet til 1,5% ved maksimalt 50 volt og 10 kHz. Mellem 10 - 20 kHz er måleafvigelsen på 3%. I forsøget benyttes frekvenser over dette niveau og den faktisk afvigelse kendes derfor ikke præcist. En måleusikkerhed på 3 procent vil for Z_1 og Z_2 ved 25 kHz betyde en forskel på op til $\pm 3 \Omega$

- Oscilloskopets stel.

I forsøgsopstillingen blev begge probers stel, koblet til stel i kredsen. Stel på oscilloskopet er fælles for begge kanaler og derfor er det ikke en nødvendighed. Anvendelse af dobbelt stel på denne måde kan give anledning til støj i målingerne og bør derfor ikke anvendes.

- Støj på spændingskurven.

Der var en ringe smule støj på den forskudte spændingskurve. Om dette kom fra den dobbelte stel til oscilloskopet, fra multimetrene eller fra AC kilden der jo er en frekvensgenerator og som derfor kun producerer en tilnærmet sinus-spænding, vides ikke.

Konklusion

Der var ikke hel overensstemmelse mellem Z_1 og Z_2 , ej heller mellem ϕ_1 og ϕ_2 . Overvejelser for diverse fejlkilder viser dog, at det ikke er noget matematisk problem, men snarere usikkerheder ved udførelsen af forsøget. Eksempelvis viste det sig at den rent resistive referencekreds alligevel ikke var rent resistiv. Derudover forekom en stigning i den indre modstand som følge af en temperaturstigning i kredsen. Disse fejlkilder vurderes at være de mest betydende årsager til afvigelsen. I sammenhæng med den mulige måleafvigelse, samt de resterende fejlkilder vurderes det, at der er redegjort for afvigelsen imellem Z_1 og Z_2 , samt ϕ_1 og ϕ_2 . Dermed lykkedes det at eftervise sammenhængen mellem U , I , Z og ϕ .

3.9.2 Måling af effekt

Formål

Formålet med dette forsøg er at eftervise sammenhængen mellem effekt, spænding, strøm og effektfaktor i ligning 3.20 på side 28

$$P = U_{rms} I_{rms} \lambda$$

Apparaturliste

Navn	Mærke og model	AAU nr.
Tonegenerator	GW Instek GFG-8216A	725 04 C06
Effektanalysator	Voltech PM100	725 01 A03
Forstærker	Amcron DC-300A	
Modstand på 10 Ω		727 06 B10
Spole med 72 vindinger		54120 fra fysiklab på basis

Teori

For at kunne eftervise forsøget, så skal effektanalysatoren ikke beregne effekten på samme måde, som der gøres i ligning 3.20 på side 28. Effektanalysatoren måler den øjeblikkelige strøm og spænding, og regner produktet af dette med en sample rate på 200 kHz. Alle disse samples regnes sammen over en hel periode, og dermed fås den mængde energi, der er afsat i den periode. Derefter divideres den fundne energi med længden på perioden, og den afsatte effekt over lasten er fundet. Dette kan udtrykkes med formelen:

$$P = \frac{1}{T} \sum_0^T u_i i_i \Delta t \quad (3.21)$$

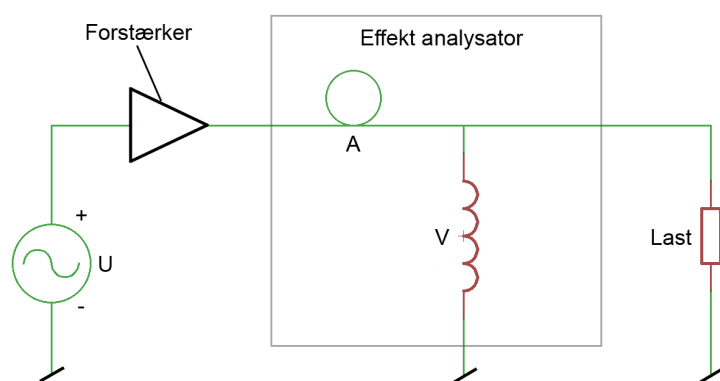
Hvor u_i er den øjeblikkelige spænding og i_i er den øjeblikkelige strøm på det tidspunkt, hvor effektanalysatoren sampler. Δt er det tidsrum, hvor samplingen foregår og T er perioden. I_{rms} bliver i forsøget beregnet ud fra ligning 3.20 på side 28, der isoleret for I_{rms} ser således ud:

$$I_{rms} = \frac{P}{U_{rms} \lambda} \quad (3.22)$$

Her bruges rms værdier der er beskrevet i afsnit 3.2 på side 20.

Forsøgsbeskrivelse

Fra tonegeneratoren bliver der dannet vekselstrøm med en given frekvens, der forstærkes i forstærkeren. effektanalysatorens amperemeter forbindes i serie med modstand og spole, herefter kaldet lasten. Voltmeteret sættes parallelt over lasten, som det ses på figur 3.14. I forsøget blev frekvensen justeret, som ændrer reaktansen jævnfør ligning 3.13 på side 25. Når reaktansen ændres, bliver effektfaktoren også ændret, og denne blev aflæst på effektanalysatoren.



Figur 3.14. Skematisk opbygning af forsøgsopstillingen

I forsøget blev frekvensen indstillet, så de ønskede effektfaktorer fremkom. Ved disse effektfaktorer blev den afsatte effekt og spændingen over lasten aflæst. Ud fra afsat effekt, spænding og effektfaktor vil strømmen gennem kredsløbet kunne beregnes. Den beregnede strøm skal være lig med den aflæste strøm for at eftervise ligning 3.20 på side 28.

Måleresultater og databehandling

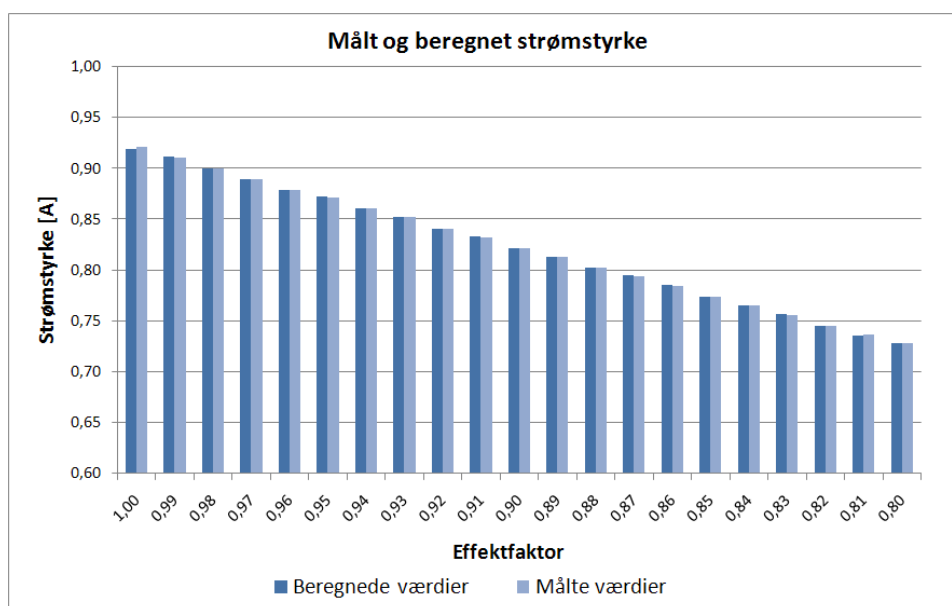
Den afsatte effekt over en last blev mål med en effektanalysator, og med den vil rms strømmen i kredsløbet kunne beregnes. effektanalysatoren kunne desuden måle strømmen, og dermed kan den målte og beregnede strøm sammenlignes. Her gives et eksempel på, hvordan udregningen blev foretaget med ligning 3.22 på forrige side.

$$P = 9,196 \text{ W}$$

$$U_{rms} = 10,001 \text{ V}$$

$$\lambda = 1,000$$

$$I_{rms} = \frac{P}{U_{rms} \lambda} = \frac{9,196 \text{ W}}{10,001 \text{ V} \cdot 1,000} = 0,920 \text{ A}$$



Figur 3.15. Søjlediagram med værdier for den beregnede strømstyrke og den målte strømstyrke

På figur 3.15 ses det, at den målte strømstyrke stemmer næsten overens med den beregnede strømstyrke. Grunden til at strømstyrken i kredsløbet faldt var, at spolens reaktans steg, når frekvensen blev øget.

Fejlkilder

Der er nogle små unøjagtigheder på grafen, som kan skyldes, at det var svært at indstille frekvensen, så der fremkom den rette effektfaktor. Spændingen blev målt direkte over lasten, men amperemeteret målte den strøm, der gik til lasten og voltmeteret. Derfor blev der i forsøget målt sand spænding.

Konklusion på forsøget

Den målte strøm stemmer næsten 100% overens, med de beregnede værdier. De meget små afvigelser skyldes sandsynligvis at det var svært at indstille frekvensen, for at få den rette effektfaktor. Dermed lykkes det således at eftervise sammenhængen mellem effekt, spænding, strøm og effektfaktor.

Modellering af effekttab 4

For en eltransmissionsforbindelse er der en lang række elektromagnetiske effekter, der ved eltransmission har en indvirkning på energitabet til omgivelserne. Der er dog nogle af disse effekter, som har en større indvirkning end andre, hvilket hovedsageligt bestemmes af transmissionsforbindelsens spændingsniveau og længde. For de scenarier, med fælles udgangspunkt i 60 kV spændingsniveauet, som her vil betragtes, så vil transmissionsforbindelsens varmeudvikling og *koronaudladning* repræsentere de største energitab [Gudmundsdottir, 2009].

Varmeudvikling opstår i både luftledninger og kabler, når der føres en strøm igennem lederen. I kraft af lederens elektriske modstand omdannes noget af den elektriske energi til varme, og der leveres således energi til omgivelserne. Som tidligere beskrevet i afsnit 3.3 på side 21, afhænger en leders elektriske modstand af dens længde, tværsnit og ledermaterialets specifikke modstand.

Koronaudladning opstår som følge af det kraftige elektriske felt, der er tilstede ved grænselaget mellem en eltransmissionsforbindelses leder og isolationsmateriale, hvilket vil være PEX eller luft for en transmissionsforbindelse, der er ført som hhv. kabel eller luftledning. Det elektriske felt vil være i stand til at ionisere isolationsmaterialet, der derved bliver strømførende, og for kabler vil virke direkte nedbrydende. Koronaudladning øges med spændingsniveauet og kan have en betydelig effekt i transmissionsnettet, men for 60 kV distributionsnettet vil koronaudladning repræsentere et ubetydeligt lille energitab i forhold til bidraget fra varmeudviklingen i transmissionsforbindelsen.

Formålet med dette kapitel er således, at modellere effekttabet til varmeudvikling i en eltransmissionsforbindelse, der er den dominerende faktor mht. energitab til omgivelserne. Beregninger vil tage udgangspunkt i følgende scenarier for en 10 km lang 60 kV transmissionsforbindelse:

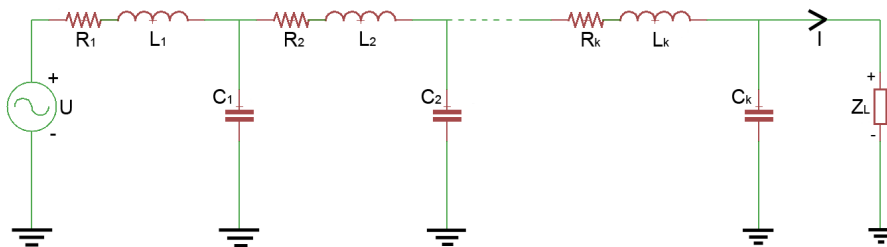
- 176 mm² stål/aluminiumsluftledning
- 150, 240, 400, 800 mm² aluminiumskabel
- 150, 240, 400, 800 mm² kobberkabel

Fælles for scenarierne er, at eltransmissionsforbindelsen er tilkoblet en last, hvori der afsættes en effekt på 10 MW ved 60 kV med en effektfaktor på 0,9. Det antages, at transmissionsforbindelsens tre faseledere er ligeligt belastet under drift, således at strømmen vil fordele sig uniformt mellem faselederne.

4.1 Eltransmissionskredsløbet

For at kunne danne et grundlag for modellering af effekttabet til varmeudvikling i en eltransmissionsforbindelse, så er det først og fremmest nødvendigt på fornuftig vis at kunne opstille et elektrisk kredsløbsdiagram for transmissionsforbindelsen. Diagrammets funktion er at gøre det muligt at benytte den veludviklede elektriske kredsløbsteori til matematisk analyse af problemstillingen præsenteret i dette kapitel.

En eltransmissionsforbindelse kan generelt modelleres som illustreret i figur 4.1 [Vørts, 1978], hvor transmissionsforbindelsen er tænkt som en sammenkobling af en lang række diskrete elementer.



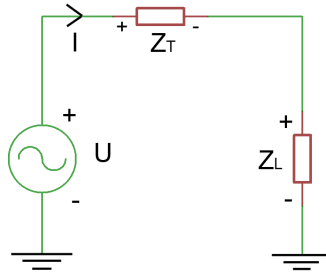
Figur 4.1. Eltransmissionskredsløb med transmissionsforbindelsen modelleret som sammenkobling af diskrete elementer.

Transmissionsforbindelsens modstand, induktans og kapacitans repræsenteres her af hhv. seriekoblede modstande, seriekoblede spoler og *shunt*¹-koblede kondensatorer. Z_L betegner lastimpedansen.

Nu forholder det sig imidlertid sådan, at en eltransmissionsforbindelse er en kontinuerlig størrelse, som ikke er opbygget af diskrete elementer, men den kan dog

¹Elektrisk parallelkobling der leder en del af indgangsstrømmen til et system udenom systemet og igennem en komponent, shunten.

stadig med rimelig nøjagtighed modelleres som sådan opbygget. For en forholdsvis kort strækning på 10 km, som her betragtes, kan eltransmissionskredsløbet i figur 4.1 på modstående side simplificeres idet, at strømmen til shunt-kondensatorerne vil være ubetydelig lille i forhold til strømmen til lastimpedansen ved typisk driftsbelastning. Eltransmissionsforbindelsen betragtes således her som udelukkende resistiv og induktiv. Figur 4.2 illustrerer det Thévenin-ækvivalente kredsløb.



Figur 4.2. Thévenin-ækvivalent eltransmissionskredsløb hvor transmissionsforbindelsen antages at være udelukkende resistiv og induktiv.

Her betegner Z_T impedans for transmissionsforbindelsen.

Den afsatte effekt P_T i transmissionsforbindelsen er givet ved

$$P_T = I^2 R_T \quad (4.1)$$

hvor R_T er modstandskomposanten af Z_T . Her behandles transmissionsforbindelsens faseledere som en enkelt leder under antagelse af, at kredsstrømmen I fordeler sig uniformt mellem faselederne.

For at bestemme P_T er det altså nødvendigt at få bestemt modstandskomposanten R_T af Z_T og kredsstrømmen I .

4.2 Kredsløbsanalyse

For et jævnstrømstilfælde, hvor lederen i transmissionforbindelsen antages at være uniform, vil det være forholdsvis simpelt at bestemme R_T , som fås direkte af

$$R_{T20} = \frac{\rho_{20} l}{A}$$

hvor R_{T20} angiver R_T ved 20 °C, ρ_{20} er lederens specifikke modstand ved 20 °C og l og A er hhv. lederens længde og tværsnitsareal.

Det forholder sig dog anderledes for vekselstrømstilfældet, hvor en række elektromagnetiske effekter, primært strømfortrængning, gør sig gældende. Resultatet er, at strømmen i lederen vil fordele sig ikke-uniformt, hvilket vil øge lederens effektive modstand. Lederen i en eltransmissionsforbindelse til vekselstrøm vil konstrueres med henblik på at minimere virkningen af fx strømfortrængning, hvilket resulterer i, at den ikke vil kunne opfattes som en fuldstændig uniform leder. Disse emner er dog særdeles omfattende og vil ikke blive yderligere behandlet her, men bemærkes som fejlkilder. Til formålet her vil R_T bestemmes som ved jævnstrømstilfældet, hvor det for en stål/aluminiums luftleder antages, at strømmen føres udelukkende i aluminiumsbåndet, hvorfor lederen behandles som en uniform aluminiumsleder.

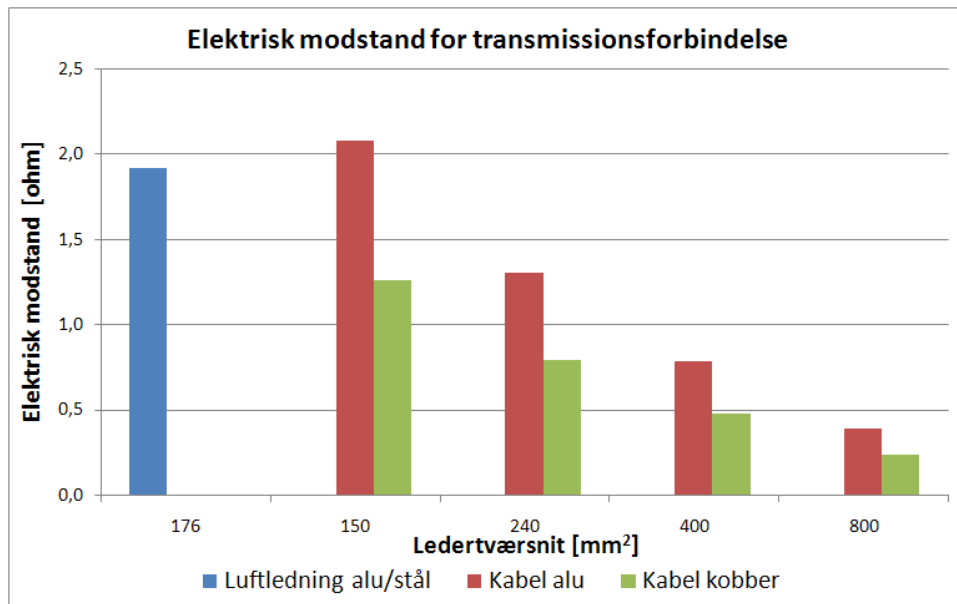
R_{T20} angiver som nævnt kun modstanden ved 20 °C, og det vil være nødvendigt at korrigere for en evt. temperaturforskel mellem denne og driftstemperaturen for lederen. Det antages, at for strækningen som her betragtes, så vil den gennemsnitlige driftstemperatur for en luftleder og kableder ligge på hhv. 25 °C og 45 °C² [Sørensen, 2009a]. For temperaturforskellene, som her betragtes, så vil lederens modstand kunne opfattes som værende direkte proportional med temperaturen [Larsen, 2006]. R_T er da givet ved

$$R_T = R_{T20} + R_{T20} \alpha_{20} \Delta T = R_{T20}(1 + \alpha_{20}(T_d - 20^\circ\text{C}))$$

hvor α_{20} er lederens temperaturkoefficient for elektrisk modstand ved 20 °C, og T_d er lederens driftstemperatur.

Figur 4.3 på modstående side viser R_T beregnet for en luftleder og kableder med udgangspunkt i strækningen, som her betragtes.

²Temperaturerne angivet her repræsenterer skøn for et årsgennemsnit for en uangiven strækning og bemærkes som fejlkilde.



Figur 4.3. Elektrisk modstand for en 10 km transmissionsforbindelse beregnet for luftleder ved 25 °C og kableder ved 45 °C af forskellige tværsnitsarealer og materialer.

For kredsstrømmen I gælder følgende

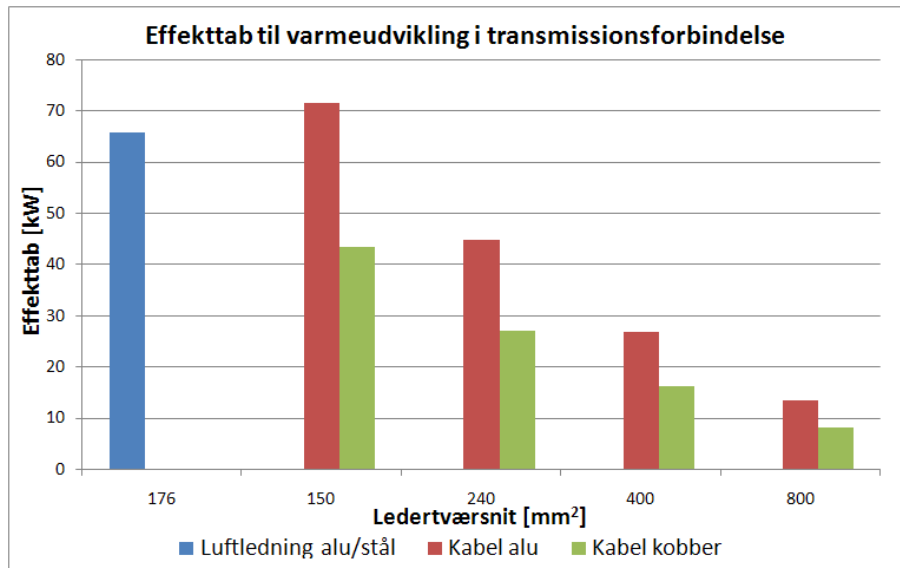
$$P_L = U_L I \lambda_L \Rightarrow I = \frac{P_L}{U_L \lambda_L}$$

Hvor $P_L = 10$ MW er effekten, der skal afsættes i Z_L , $U_L = 60$ kV er spændingsfaldet over Z_L og $\lambda_L = 0,9$ er effektfaktoren, hvorved der afsættes effekt i Z_L .

4.3 Resultater

Med R_T og I kendt er det således muligt at bestemme P_T , jf. ligning 4.1.

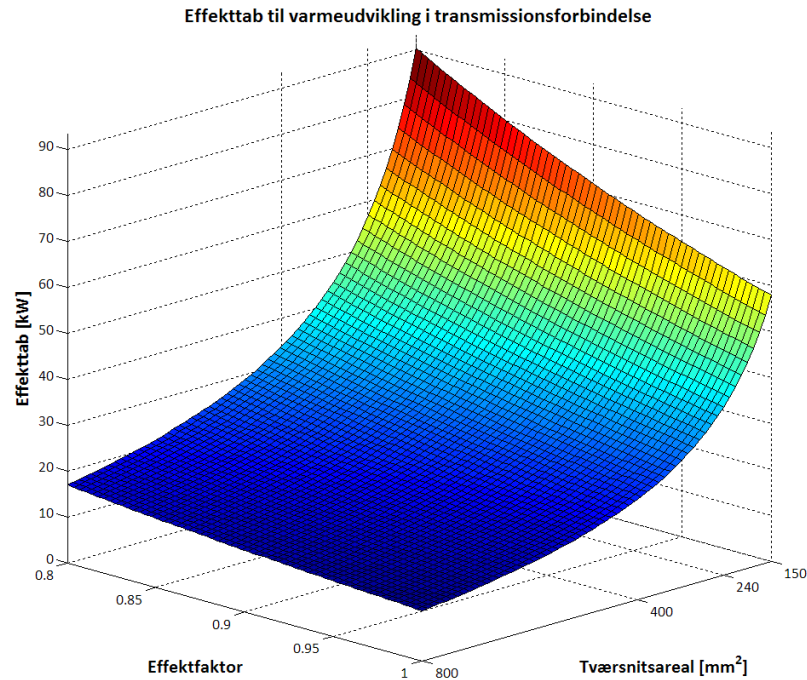
Figur 4.4 viser P_T beregnet for en luftleder og kableder med udgangspunkt i strækningen, som her betragtes.



Figur 4.4. Effekttab til varmeudvikling i en 10 km transmissionsforbindelse, for en last på 10 MW ved effektfaktor 0.9, beregnet for luftleder ved 25 °C og kableder ved 45 °C.

Hvilket afspejler den direkte proportionalitet mellem den afsatte effekt i transmissionsforbindelsen og lederens modstand, hvor strømmen i lederen er konstant, jf. ligning 4.1. Det bemærkes, at kobberkabler generelt tilbyder en væsentlig reduktion i effekttab, hvilket er udtryk for kobbers relativt lave specifikke modstand.

Figur 4.5 viser P_T beregnet for en aluminiumskableder som funktion af lederens tværsnitsareal og lastens effektfaktor.



Figur 4.5. Effekttab til varmeudvikling i en 10 km transmissionsforbindelse, for en last på 10 MW, beregnet for kableder af aluminium ved 45 °C.

Det ses, at for transmissionsforbindelser af lavere tværsnitsarealer, så har lastens effektfaktor betydeligt større indflydelse på effekttabet end for de højere tværsnitsarealer. Dette vil betyde, at hvis der investeres i et kabel med et større tværsnitsareal, så vil effektfaktoren kunne sænkes, uden at det vil resultere i et større effekttab i lederen. Det kan desuden ses, at der er mindst effekttab, når både tværsnitsarealet og effektfaktoren er størst.

Teknisk-økonomisk model og analyse

5

5.1 Økonomisk opgørelse af energitabet

Efter at have bestemt sammenhængen imellem energitabet i en leder og dens tværsnit, er det interessant at opgøre forholdet økonomisk ved at bestemme priser for energi og ledermaterialet. Sammenhængen mellem tabsomkostninger og ekstra materialeomkostninger kan bruges til at finde den mest rentable kabelløsning.

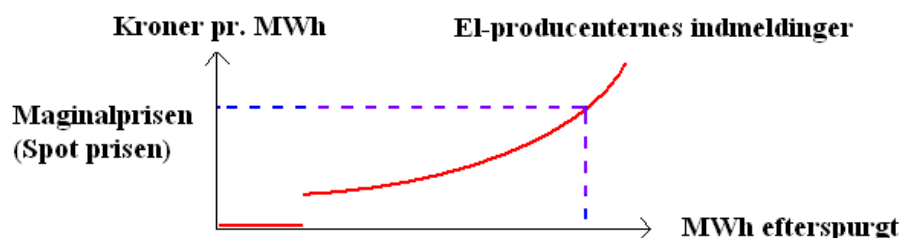
5.1.1 Nord Pool Spot

For at fastsætte værdien af energitabet i modellen, forsøges det i dette afsnit at bestemme en gennemsnitlig elpris. Oplysninger om elpriser findes på den nordiske elbørs Nord Pool Spot. Nord Pool Spot er ejet af de nordiske transmissionsoperatører (TSO'er). I Danmark er Energinet.dk som bekendt TSO. Nord Pool Spot muliggør et elmarked imellem producenter, forsyninger, erhvervsværker, firmaer, store forbrugere og TSO'er, hvor strømmen frit kan handles. I 2007 blev der gennem Nord Pool Spot handlet over 290,6 TWh.

På Elspot markedet fastsættes elpriserne i den enkelte time, for det kommende døgn. Prisberegningen er baseret på balancen imellem udbud og efterspørgsel. Elproducenterne indmelder hver formiddag, hvilken pris de kan producere strømmen til, dagen efter i den enkelte time. Indmeldingen kan foregå uden pris (prisafhængigt) eller med en mindstepris pr. time. Sker indmeldingen prisafhængigt, bestemmer markedet prisen og elproducenten vinder hver gang rettigheden til at producere en bestemt mængde strøm til marginalprisen. Vindmølleejere indmelder altid prisafhængigt, da de ikke er interesseret i at skulle stoppe deres vindmøller når det blæser. Dette kan der dog blive ændret på ved indførslen af negative spot priser i oktober

2009 [Markedschef i Energinet.dk, 2009]. Sker indmeldingen i stedet med en mindstepris pr. time, afhænger det af maginalprisen i den enkelte time, om elproducenten vinder aktionen og dermed rettigheden til at producere en bestemt mængde strøm i en givet time.

Figur 5.1 viser et opstillet eksempel på hvordan marginalprisen bestemmes. Den røde graf afspejler elproducenternes indmeldinger af den pris, hvortil de kan producere en vis mængde strøm. Årsagen til at grafen ligger i 0 kr i den første del af grafen, skyldes at en række elproducenter har indmeldt prisuafhængigt. Grafen hopper fra 0 kr til et højere prisniveau, da andre elproducenter indmelder til en mindstepris for en bestemt mængde strøm. Den vertikale blå søjle viser efterspørgslen på strøm, og maginalprisen kan således findes ved hjælp af den blå horisontale linie [Nordpool, 2009a].



Figur 5.1. Eksempel på hvordan maginal prisen bestemmes. X-aksen viser efterspørgslen på strøm i MWh, mens y-aksen viser prisen i kroner pr. MWh. Den røde graf afspejler elproducenternes indmelding af, til hvilken pris de kan producere en vis mængde strøm

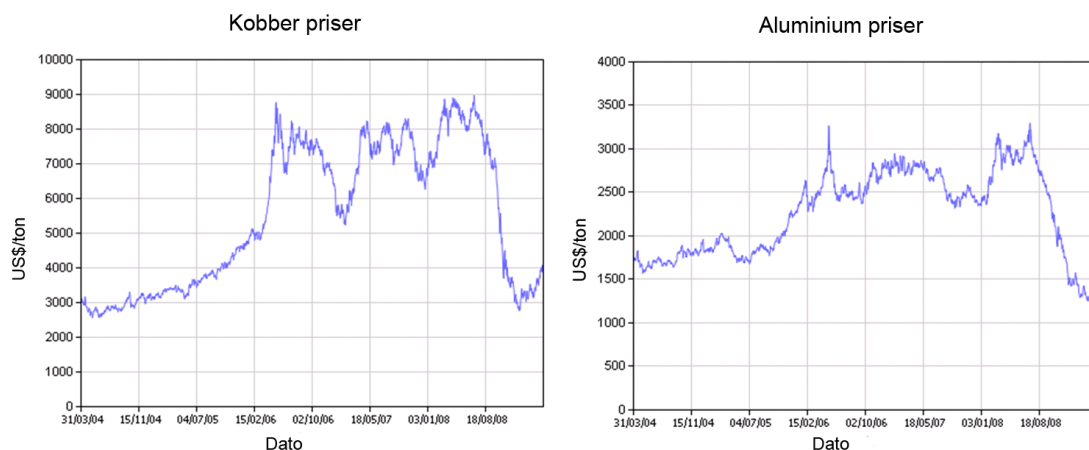
Tabel 5.1 på modstående side viser gennemsnitspriser fra Nord Pool Spot for Vestdanmark fra årrækken 2004-2008. Det samlede gennemsnit er fundet for de 5 år. Elpriserne varierer fra år til år, og det er derfor nødvendigt, at have data fra flere år for at få en mere realistisk elpris. De store udsving fremstår bl.a. som konsekvens af såkaldte våde og tørre år.

Elpriser års-gennemsnit	Pris i kroner pr. MWh i Vest-danmark
2004	214,28 kr
2005	277,44 kr
2006	329,54 kr
2007	241,37 kr
2008	420,70 kr
Samlet gennemsnit	344.94 kr

Tabel 5.1. Gennemsnitspriser for Nord Pool Spot i Vest-danmark. Der tages udgangspunkt i priser fra årrækken 2004-2008. Nederst findes det samlede gennemsnit af elpriserne fra de 5 år. Data fra [Nordpool, 2009b]

5.1.2 Materiale priser

Kabler og luftledninger produceres med ledere af kobber eller aluminium. Det er derfor interessant at se på hvilke anskaffelsesomkostninger der er forbundet med disse metaller. Kobber og aluminium handles på metalbørsen London Metal Exchange. Gennemsnitsprisen for 1 ton aluminium fra 1. januar - 31. marts i 2009 var 1359 \$, mens den i samme periode for 1 ton kobber var 3747,8 \$ [London Metal Exchange, 2009]. En forskel på 2388,8 \$ pr. ton råmateriale svarende til, at kobber i denne periode var ca. 2,8 gange dyrere end aluminium.



Figur 5.2. Viser markedsprisen for kobber og aluminium i dollars/ton for en 5-årig periode 2004-2009. [London Metal Exchange, 2009]

Markedspriserne for kobber og aluminium har fra 2004-2009, varieret betydeligt.

Dette afspejles af figur 5.2 på foregående side, hvoraf det fremgår at markedsprisen for kobber har været helt oppe og tangere 9000 \$ i 2008, mens prisen i 2004 var nede omkring 2600 \$. Prisen for aluminium er ligeledes varierende og set over samme tidsperiode er der en vis lighed for de to metaller pris-udvikling.

Kobber har en større densitet sammenlignet med aluminium, jævnfør tabel 3.1 på side 22. En leder i kobber vejer således mere end en leder i aluminium ved samme længde og tværsnit. Det gør prisforskellen endnu større når to lige store ledere af aluminium og kobber sammenlignes. Gennemsnitsprisen var således i perioden 1. januar - 31. marts i 2009 for 1 m³ aluminium 3669.3 \$, mens gennemsnitsprisen i samme periode for 1 m³ kobber var hele 33318 \$. Gennemsnitsprisen for 1 m³ kobber var dermed i perioden mere end 9 gange større end den for aluminium. Kabelproducenten NKT Cables påpeger ligeledes at forholdet mellem pris og overføringsevne er stærk ugunstigt for at producere kabler med kobberleder sammenlignet med en aluminiumsleder [NKT Cables, 2009].

5.1.3 Kabelpriser

Figur 5.2 viser vejledende kabelpriser pr. meter fordelt på forskellige tværsnit af kabeltypen PEX-M-AL-LT 72 kV fra NKT Cables. Kabelpriserne på denne type kabel anvendes som basis for de samlede kabelomkostninger, beskrevet senere i dette kapitel.

Tværsnit mm ² Al + Cu	Vejl. pris pr. m. kr
150 + 25	95
240 + 35	110
400 + 50	130
800 + 50	175

Tabel 5.2. Tabellen viser vejl. priser på fire forskellige tværsnit af kabeltypen PEX-M-AL-LT 72 kV. Venstre kolonne viser det samlede tværsnitsareal bestående af lederen (Aluminium) + skærmen (Kobber). Data fra: [NKT Cables, 2009]

Det er bemærkelsesværdigt, at selvom tværsnittet fordobles fra 400 mm² til 800 mm², øges den vejledende kabelpris pr. meter kun med 45 kr svarende til en prisstigning på ca. 35 %. Dette viser at prisen for kabler også afhænger kraftigt af andre faktorer end ledertværsnittet.

5.1.4 Levetid

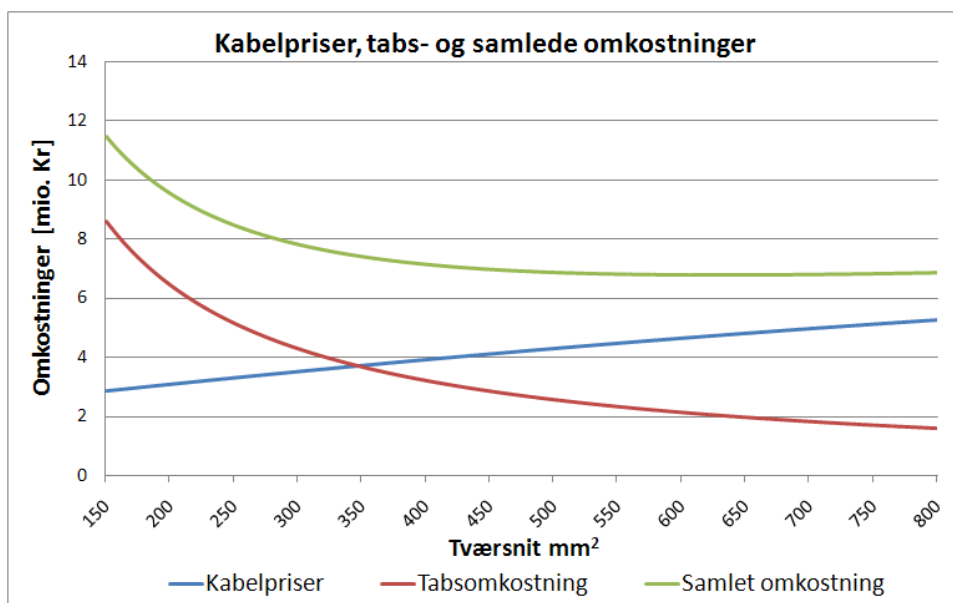
I forbindelse med bestemmelse af den mest rentable kabeltype ønskes det, at sætte tabsomkostningerne i perspektiv med investeringsomkostningerne over hele kablets levetid. Levetiden for de fleste komponenter i elforsyningen er i dag omkring 40 år. Desuden er det ikke unormalt, at se udstyr, der efter denne årrække stadig er intakt. At nogle komponenter er ældre end 40 år, kan give problemer da producenten i mange tilfælde ikke længere eksisterer. Derved kan det være nødvendigt at udskifte flere komponenter pga. manglende reservedele [Akademiet for de Tekniske Videnskaber, 2001]. De 60 kV kabler der etableres i dag, forventes også at have en levetid på ca. 40 år [Sørensen, 2009a].

5.1.5 Optimering af rentabiliteten

I kapitel 4 lykkes det, at opnå resultater for energitabet ved forskellige tværsnitsarealer af bl.a. aluminiums kabler for et givet scenarie. I denne sammenhæng er det aktuelt at se på de økonomiske nøgletal for både kabel- og energiomkostningerne. Det er ikke nødvendigvis det kabel med mindst energitab, som viser sig at have den laveste samlede omkostning. Derfor bestemmes den løsning, der vil være den samlede mest økonomisk rentable set over kablets levetid. Det vurderes, at vedligeholdelses- og anlæggelsesomkostninger, uanset tværsnit, er ens for den anvendte kabeltype (PEX-M-AL-LT 72 kV). Derfor ses der bort fra disse omkostninger i følgende analyse.

For at kunne bestemme kabelprisen for vilkårlige tværsnit i intervallet 150 mm^2 - 800 mm^2 laves en regression af de data vist i tabel 5.2 på modstående side. Funktionen for vejledende kabelpriser i forhold til tværsnit, er udelukkende baseret på 4 datasæt, hvilket derfor er behæftet med en vis usikkerhed. Grænserne for tværsnittet holdes dog i intervallet 150 mm^2 - 800 mm^2 , hvorfor udtrykket for kabelpriser alligevel findes troværdigt.

Figur 5.3 på næste side viser kabelpriser og tabsomkostninger som funktion af tværsnitsarealet samt en graf for de samlede omkostninger. Graferne er givet ved de samme forudsætninger som i kapitel 4, og det antages desuden at kablernes levetid er 40 år. Vest-danmarks gennemsnitslige elpris fra Nord Pool Spot (344,94 kr/MWh) anvendes til beregning af tabsomkostningerne. De samlede omkostninger, for både tabs- og kabelomkostninger, viser hvilket tværsnit der er det mest økonomisk fordelagtigt over en periode på 40 år.

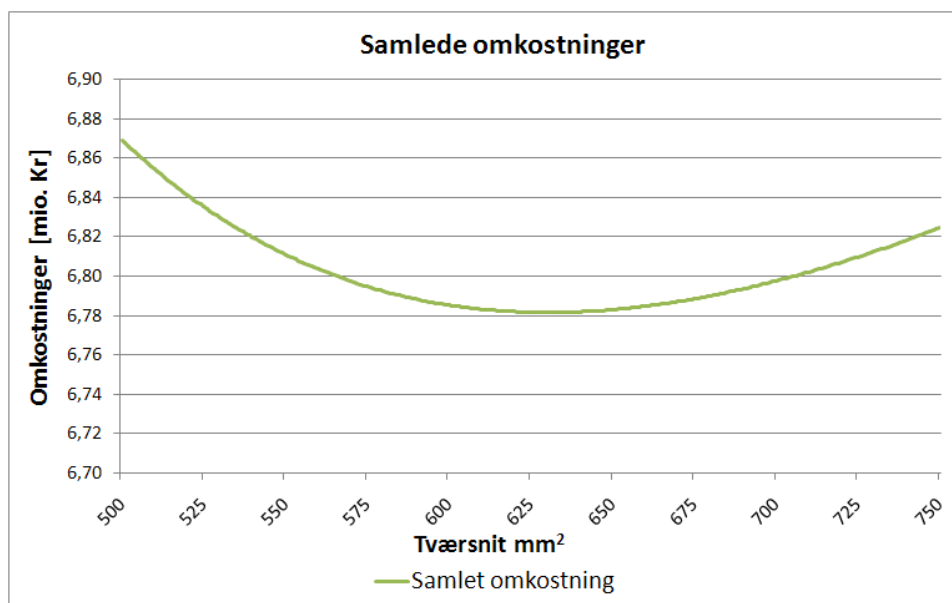


Figur 5.3. Her ses omkostningerne i mio. kr som funktion af tværsnitsarealet (mm^2) for hhv. kabler og energitab. Desuden er summen af disse omkostninger vist.

Det ses på figur 5.3, at kabelprisen stiger med tværsnittet. Desuden viser figuren at omkostningerne for tabet afspejles som hyperbel og aftager, som forventet, ved stigende tværsnitsareal.

Grafen for kabelpriser skærer grafen for tabsomkostninger ved ca. 350 mm^2 . Denne skæring er dog ikke et udtryk for det mest optimale tværsnit, men blot et udtryk for hvor tabsomkostninger og prisen på kablet med dette tværsnit, er ens. Det økonomiske mest rentable tværsnit findes i stedet der, hvor tabsomkostningerne og kabelprisen tilsammen er mindst. Dette er på figuren udtrykt med grafen, samlet omkostning.

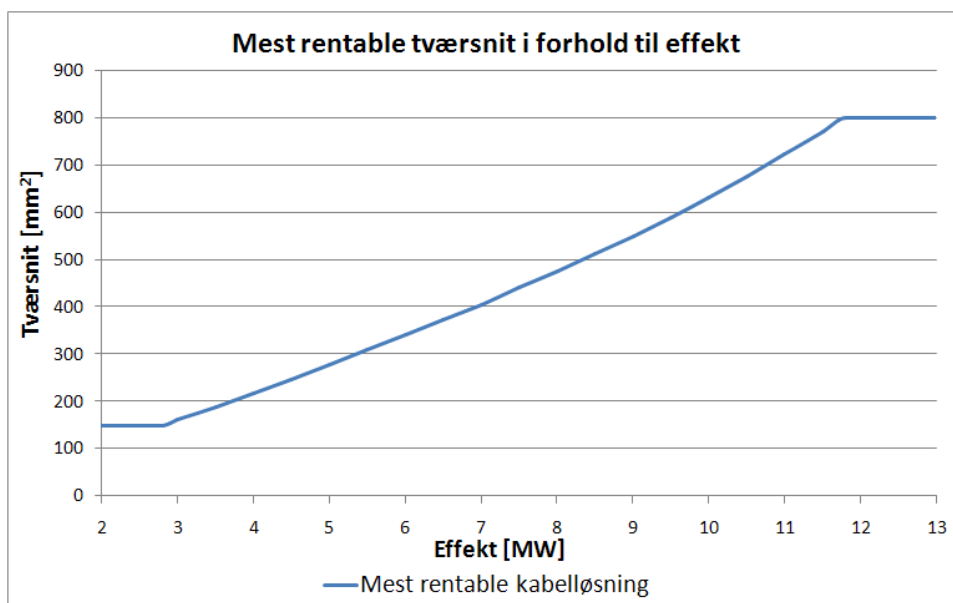
På figur 5.4 på næste side synliggøres det, ved hvilket tværsnit de samlede omkostninger er mindst. Denne er afbilledet i intervallet $500 - 750 \text{ mm}^2$ da det er her, det umiddelbart fremgår, at omkostningerne er mindst.



Figur 5.4. Her ses grafen for de samlede omkostninger, for kablens tværsnit fra 500 mm² til 750 mm². Den mindste omkostning, for dette scenarie, er ved et tværsnit på præcis 630 mm².

Den mindste samlede omkostning findes ved et ledertværsnit på præcis 630 mm², ved det givne scenarie fra afsnit 4. I kabelproducenten NKT's produktkatalog [NKT Cables, 2004] fremgår det, at de producerer kabler af denne type med netop dette tværsnit. Det er dermed muligt at købe et kabel med det i modellen udregnede mest rentable tværsnit.

Som nævnt tidligere er det mest rentable tværsnit bestemt ved en gennemsnitlig effektoverførsel på 10 MW. Ønskes i stedet at overføre en større eller mindre effekt er det interessant at bestemme, hvilket tværsnit som fremstår økonomisk rentabelt.



Figur 5.5. Her ses grafen for det mest rentable tværsnit ved forskellige effektoverførsler. Denne findes for en levetid for kablet på 40 år.

Figur 5.5 viser det økonomisk mest rentable tværsnit, som funktion af den ønskede overførte effekt. Ønskes det eksempelvis at overføre lidt under 3 MW er det mest rentabelt at vælge et tværsnit på 150 mm². Er det i modsætning aktuelt at overføre ca. 7 MW vil det rentable tværsnit fremstå som værende 400 mm². Effekten, som overføres i kablet, har således stor betydning for hvilket tværsnit, der skal vælges for at tabsomkostningerne sammenlagt med kabelprisen bliver mindst mulig over en periode på 40 år.

5.2 Etableringsomkostninger

Efter at have bestemt det bedste og billigste alternativ til en luftleder, med henblik på energitab og kabel størrelse, er det interessant at se på hvilke andre omkostninger, der er tilknyttet en kabellægning. Som det vil fremgå i følgende afsnit, er det svært at sætte nøjagtige tal på etableringsomkostningerne for nye kabelanlæg. Det forsøges dog at give et indtryk af omkostningernes omfang.

Ved etablering af kabel-anlæg vil en af de økonomiske omkostninger bestå i selve anlæggelsen. Anlæggelsesomkostningerne afhænger i høj grad af i hvilket miljø kabeltracéet etableres. Omkostninger forbundet med anlæggelse af kabeltracéer i byer er langt større end ved anlæggelse i landbrugsjord [Sørensen, 2009a]. Dette skyldes, at der i byer, i større grad end på landet, findes kommunikationskabler,

kloakering, vand og fjernvarme i jorden. Derudover er det omkostningsfuldt at opbryde vejbelægning. Desuden er det i byer ofte sværere at afspærre veje og cykelstier hvorfor anlægningsarbejdet skal udføres på mindre plads end på landet.

5.2.1 Erstatning til grundejere

En anden økonomisk faktor ved etablering af kabelanlæg er erstatninger til grundejeren for brug af grunden. Ved anbringelse af kabelanlæg på privat grund vil der i de fleste tilfælde forefalde en kompensation i form af økonomisk erstatning. Erstatningens størrelse afhænger eksempelvis af længden af en kabelstrækning og bredden af denne.

Hvis grundejeren bor i byen, er der ofte mange forskellige forhold som varierer fra tilfælde til tilfælde. Derfor vil det i de fleste situationer være en vurderingssag af hvert enkelt tilfælde, som er gældende for erstatningens størrelse. Bor grundejeren derimod på landet gælder landsaftalen: *Elanlæg på landbrugsjord 2008* som grundregel.

Ved etablering af kabelanlæg på privatejede landsbrugsarealer ydes der erstatninger i henhold til landsaftalen. De berørte lodsejere vil få udbetalt et engangsbeløb som er vedtaget i den omtalte landsaftale udarbejdet af Dansk Landbrug, Dansk Energi og Energinet.dk. Etablering af kabelanlæg på privatejede arealer kan udføres efter aftale med den berørte lodsejer eller ved ekspropriation¹. Retningslinjerne i landsaftalen er kun gyldige, hvis etablering af kabelanlæg på privatejede arealer udføres efter aftale med den berørte lodsejer. Derudover gælder landsaften kun i de tilfælde hvor der er tale om almindelige landbrugsjorder, det vil sige, at landsaftalen ikke er gældende for ejendomme, hvis værdi i væsentlig grad er påvirket af ikke landbrugsmæssige forhold. En lodsejer kan desuden ikke opnå erstatning, hvis elanlægget udelukkende er etableret for at forsyne lodsejerens ejendom. Ekspropriation kan være nødvendig, hvis der ikke kan indgås en frivillig aftale mellem elselskab og lodsejer om etablering af elanlæg på dennes jord. Elselskabet kan i denne situation ifølge stærkstrømsloven søge om tilladelse til at ekspropriere [Dansk Landbrug, 2008].

Tabel 5.3 på næste side viser hvilken erstatning, der ydes ved kabellægning på landbrugsareal. Der gives et grundbeløb på 3764 kr uanset anlæggets brede, dog skal der mindst være 100 meter kabel, hvis anlæggets brede er under 20 cm. Udover grundbeløbet får lodsejeren tildelt en af de 3 forskellige satser pr. løbende meter,

¹Ekspropriation betyder tvungen afståelse af ejendomsret. Hvis etablering af eksempelvis et el-anlæg er af almen interesse for landets borgere, har det offentlige ret til at ekspropriere den jord, der skal bruges til arbejdet. Grundejeren har ret til fuld erstatning.

afhængigt af anlæggets bredde.

Anlæggets Bredde	Erstatning pr. løbende m.	Grundbeløb
≤ 20 cm	12,90 kr	3764 kr(indeholder 100m kabelanlæg)
> 20 cm ≤ 50 cm	17,21 kr	3764 kr
> 50 cm ≤ 100 cm	23,66 kr	3764 kr

Tabel 5.3. Erstatninger til lodsejere for etablering af kabelanlæg på deres jord. Data fra [Dansk Landbrug, 2008]

Desuden ydes en ekstra erstatning på 2,69 kr pr. m^2 , hvis der pålægges et såkaldt deklarationsareal. Et deklarationsareal er et areal omkring kabeltracéet, hvorom der gælder særlige regler. Disse regler beskrives i en deklarationstekst, som kan variere alt efter den enkelte situation. Der er dog udarbejdet en vejledende deklarationstekst for kabelanlæg med spændingsniveauer til og med 20 kV, samt en for spændingsniveauer over dette niveau. I den vejledende deklarationstekst for kabelanlæg over 20 kV fremgår det bl.a., at der kun under særlige omstændigheder må opføres bygninger, veje eller terrænændringer indenfor deklarationsarealet. Deklarationsareal pålægges oftest på spændingsniveauer over 50 kV[Dansk Landbrug, 2008].

Ligeledes findes standard retningslinjer for erstatninger ved anbringelse af transformerstationer på landsbrugsjord. Disse fremgår af tabel 5.4 og afhænger udelukkende af hvor stort et areal transformerstationen dækker. Der udbetales dog kun 1/3 af det angivne beløb, hvis transformerstationen står i et udyrket areal[Dansk Landbrug, 2008].

Anlæggets størrelse	Erstatning
Indtil 2 m^2	12.904 kr
Fra 2 m^2 indtil 6 m^2	15.055 kr
Fra 6 m^2 indtil 10 m^2	19.356 kr
Fra 10 m^2 indtil 15 m^2	26.884 kr

Tabel 5.4. Erstatninger til lodsejere for etablering af transformatorstationer. Data fra [Dansk Landbrug, 2008]

5.3 Vedligeholdelse

En anden økonomisk faktor ved at drive elanlæg er vedligeholdelsen af disse. Vedligeholdelse af kabler og luftledninger adskiller sig meget fra hinanden. Kabler er praktisk talt vedligeholdelsesfri mens luftledninger skal have planlagte eftersyn [Miljø- og Energiministeriet, 1995].

Stærkstrømsloven kræver at højspændingsluftledninger mindst hvert tredje år efterses [Erhvervs- og Økonomiministeriet, 2005], hvor eftersynet bl.a. indebærer kontrol af at træer og buskes afstand til luftledningerne samt inspektion efter synlige fejl på isolatorer. Ved 3 års eftersynet skal hele luftledningstracéet enten vandres, køres eller flyves igennem. Udover 3 års eftersynet skal der mindst hvert sjette år foretages et særligt grundigt eftersyn. Dette eftersyn kræver bl.a. ekstra grundigt eftersyn af isolatorer, bolte og klemmer, i de tilfælde hvor luftledninger er i nærheden af bygninger eller krydser veje, jernbaner eller andre luftledninger. Desuden efterses masternes tilstand. Det er et krav at hele luftledningstracéet vandres igennem fra mast til mast ved det grundige eftersyn.

Vedligeholdelsesomkostningerne af luftledningstracéer afhænger af en række forskellige faktorer såsom hvilke materialer der er anvendt, materialets alder og geografisk placering. Den geografiske placering af luftledningstracéer har indflydelse på hvordan vind og vejr påvirker og tærer på materialerne. Et par eksempler på renovering af luftledningsanlæg kan være udskiftning af isolatorer eller reparation af master og betonsokler. Vedligeholdelse på luftledningsanlæg kan også indeholde opgaver som trækledning, for derved at undgå at luftledningstracéet rammes af væltende træer.



Figur 5.6. Viser en helikopterinspektion af et luftledningsanlæg

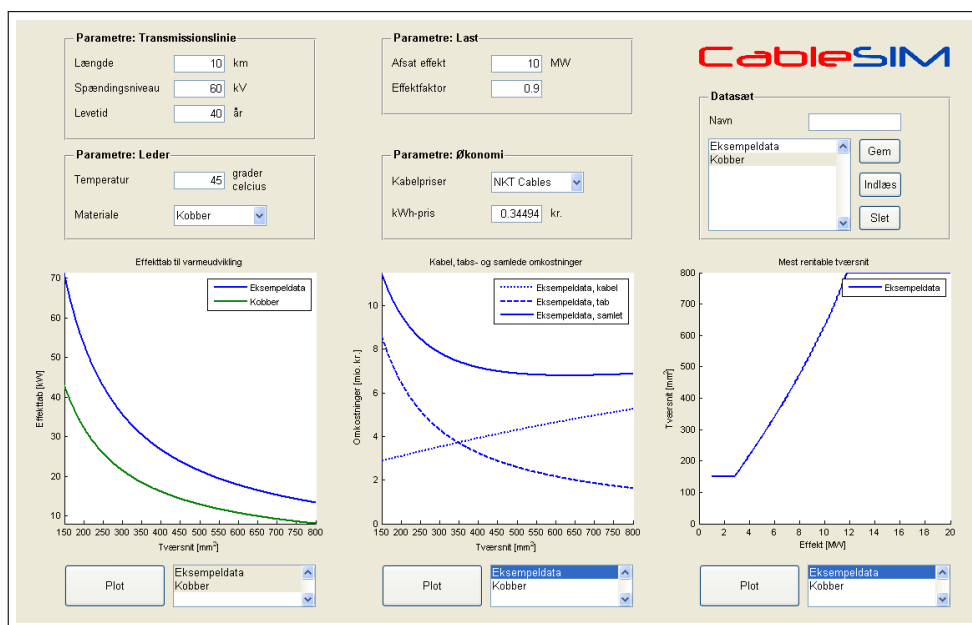
Netselskabet Nyfors budgetterer i 2009 med at bruge 2,7 millioner kr. på vedligeholdelse af deres 60 kV luftledningsnet. Dette foregår som et led i levetidsforøgelse, hvormed kabellægningen af eksisterende luftledninger kan udsættes. I alt renoveres i 2009 62,29 km af i alt 142,5 km 60 kV luftledning. Vedligeholdelse af 60 kV luftledninger hos Nyfors foregår konkret ved at der hvert 3. år laves en helikopter overflyvning af luftledningstracéet, hvor en tekniker ved hjælp af en kikkert noterer hvilke elementer som skal repareres. For at udbedre de noterede elementer afbrydes strømmen og reparationerne kan påbegyndes. Nyfors har også et 6 års eftersyn af deres højspændingsluftledninger som stærkstrømsloven kræver [Sørensen, 2009a].

5.4 CableSIM

På baggrund af beregningerne og analyserne i kapitel 4 og 5 er der lavet et program med en brugerflade således, at brugeren kan anvende programmet til at bestemme det mest optimale tværsnit af lederen ved kabellægning af en 60 kV forbindelse. Programmet hedder CableSIM og er programmeret i MATLAB.

CableSIM simulerer en kabellægning for en valgt strækning, hvor brugeren selv kan fastsætte en række parametre for lasten, transmissionslinjen, lederen samt priser for kabler og energitab. Udfra disse oplysninger beregner programmet størrelsen af energitabet og nogle af de omkostninger, der er forbundet med en kabellægning, herunder energitabsomkostningerne og kabelpriserne. Alt efter brugerens ønsker kan programmet finde frem til det specifikke kabel, som vil være økonomisk mest rentabelt.

CableSIM kan også plotte flere forskellige datasæt på én gang således at brugeren let kan få et overblik over forskellige kabeltypers egenskaber. Til beregninger anvender CableSIM kabelpriser fra den anerkendte kabelproducent NKT Cables.



Figur 5.7. Screenshot af CableSIMs brugerflade.

Tip: Ønskes det at plotte mere end én dataserie, kan flere dataserier markeres ved at holde Ctrl nede.

Konklusion 6

Ud fra den overordnede vision om kabellægning af elnettet, er det for 60 kV spændingsniveau blevet undersøgt, hvilken indflydelse denne kabellægning vil have med hovedvægt på energitab. Derudover er det undersøgt hvilke faktorer der spiller ind på størrelsen af tabet.

Gennem en teknisk-økonomisk analyse er sammenhængen imellem en leders energitab og dens temperatur, materiale og faseforskydningen mellem strøm og spændning bestemt. Således er effekttabet bestemt for et givet scenarie og den mest rentable kabelløsning er fundet.

Sammenlignes en luftledning og et kabel med ens ledertværsnit, vil energitabet være størst i kablet, som følge af en højere driftstemperatur i lederen. Lederen i et kabel skal derfor have et større tværsnit end en luftledning, da kablets modstand således reduceres og dermed også varmetabet. Anvendes kobber som leder frem for aluminium, opnås en langt lavere modstand i lederen. Dog er det omkring 9 gange dyrere at anvende kobber end aluminium.

Effektfaktoren har ligeledes indflydelse på energitabet. Jo større effektfaktoren er, jo mindre energi går der tabt i lederen.

På den, i rapporten, modellerede strækning kan det konkluderes, at den økonomisk mest rentable kabelløsning er PEX-M-AL-LT 72 kV med et ledertværsnit på 630 mm². En leder med dette tværsnit vil, udover at være økonomisk rentabelt, også sænke den afsatte effekt i kablet i forhold til en typisk luftleder. Der er dog i modellen taget en række forbehold af hensyn til rapportens omfang. Disse forbehold er væsentlige i forbindelse med en direkte dimensionering af et nyt kabeltracé. Derfor kan rapportens resultat ikke stå alene i en analyse for bestemmelse af den mest optimale kabelløsning.

Perspektivering 7

Rapporten har hidtil beskæftiget sig primært med energitab og økonomiske konsekvenser deraf. Ved en kabellægning af en luftledning forkommer der også andre forhold, der ikke umiddelbart kan opgøres økonomisk.

I dette afsnit beskrives de visuelle og de sundhedsmæssige ændringer, samt hvilken betydning det har for forsyningssikkerheden, at kabellægge en luftledning.

7.1 Visuel forurening

Kabler og luftledninger er visuelt to helt forskellige ting. Den væsentligste visuelle forskel er, at luftledningsanlæg kan beskues, mens kabler vil være nedgravet og dermed ikke er til visuel gene. Derfor skaber etableringen af nye luftledningsanlæg altid konflikt med omgivelserne, dog vil omfanget af disse selvfølgelig variere i større eller mindre grad [Energinet.dk, 2008c]. Luftledningsanlæg påvirker landskabet betydeligt, i kraft af deres størrelse og tracélængde. Ligesom veje, jernbaneanlæg og øvrig infrastruktur skal det altid afvejes hvor anlæggelse af luftledningsanlæg vil have mindst mulig effekt på landskabet [Energinet.dk, 2008c].

Der er en række forskellige faktorer i landskabet, der afgør hvor stor en visuel effekt luftledningsanlæg vil have. Terrænet kan både forstærke og formindske den visuelle effekt fra luftledningsanlæg. Er terrænet fladt vil luftledningsanlæg fremstå klart og dominerende, mens kuperet terræn vil kunne skjule luftledningsanlæg fra længere afstand. Det er dog vigtigt at pointere, at luftledningsanlæg bør vurderes i forhold til samspillet med omkringliggende elementer i landskabet. Her tænkes eksempelvis på bygninger eller naturskønne områder. Det er ikke muligt, at give en konkret facitliste til hvordan luftledningsanlæg skal placeres i landskabet, da der findes utallige forhold at tage hensyn til [Energinet.dk, 2008a]. Figur 7.1 og figur 7.2 på næste side viser hhv. et billede af et landskab, som fremstår upårvirket af el-anlæg, og et billede af

det samme landskab hvor der er placeret en luftledning. Luftledningen påvirker i høj grad dette naturskønne område, og kommer til at fremstå kraftigt dominerende.



Figur 7.1. Viser et landskab som ikke er visuelt påvirket af et luftledningsanlæg. Landskabet fremstår derfor upårvirket og naturligt.



Figur 7.2. Viser samme landskab som figur 7.1, dog er landskabet her visuelt påvirket af et luftledningsanlæg

Energinet.dk og COWI har udviklet et værktøj til at vurdere påvirkninger ved at erstatte luftledningsanlæg med kabelanlæg. Værktøjet er baseret på Geografisk Informations System (GIS) og bruges til at vurdere de positive påvirkninger ved fjernelse af luftledningstracéer, samt de negative påvirkninger ved etablering af kabeltracéer. Ved brug af GIS-værktøjet vil det være muligt at udvælge et område hvorefter værktøjet vil lave to scenarier. Et scenarie med de positive påvirkninger af fjernelse af luftledninger, og et scenarie med negative påvirkninger ved kabellægning. Herved vil det således være muligt at klarlægge geografisk, hvor kabeltracéer kan etableres frem for eksisterende luftledninger med størst positiv effekt [Energinet.dk, 2008c]. Systemet finder de negative og positive sider ved kabellægning af en luftledning, men tillægger ikke konsekvenserne nogen værdi. Det er derfor ikke hensigtsmæssigt blot at trække antallet af negative sider fra de positive, da én

positiv side i virkeligheden kan opveje flere negative. GIS-Værktøjet vil aldrig give en fuldstændig objektiv vurdering af positive og negative effekter ved fjernelse af luftledningsanlæg og samtidig kabellægning. Værktøjet gør derimod vurderingen mere anskuelig [Energinet.dk, 2008c].

Visuel forurening fra luftledningsanlæg er betydeligt afhængigt af afstanden fra beskueren til anlægget. Jo tættere på luftledningsanlægget beskueren befinder sig, desto større er den visuelle påvirkning, da master her er dominerende og skaber stor ubalance i det omgivende miljø.

En kabellagt strækning vil kun i få tilfælde være til synlig gene i landskabet. Oftest vil de synlige konsekvenser for kabler opstå i forbindelse med gennemskæring af skove, plantage eller i nærheden af stationer.

7.2 Koronastøj

Kabler udsender ikke hørbar akustisk støj, og derfor tages der i denne beskrivelse hovedsagligt udgangspunkt i støj fra luftledninger. Støj fra luftledninger kaldes koronastøj og stammer fra små elektriske ladningers ionisering af den omgivende luft omkring lederen.

Støjniveauet fra en luftledning afhænger af spænding, lederens overflade og de metrologiske forhold [COWI, 2009]. I tørre perioder vil koronastøjen være meget lav, og kun insekter, blade og andre uregelmæssigheder omkring lederen vil give kortvarig koronastøj. I fugtigt vejr vil koronastøjen være kraftig, da regndråber på luftledningen vil medføre koronaafledninger, der vil kunne høres som en knitren. Dog vil støjen bemærkes i mindre grad pga. lyden fra regnvejret. I frostvejr vil koronastøjen også være høj, men vil hovedsagligt kunne høres som en brummen.

Støj fra luftledninger reguleres efter de værdier, der fremsættes i miljøstyrelsens vejledning: *Ekstern støj fra virksomheder - 1985*. Vejledningen forskriver, at der tages udgangspunkt i en lokal vurdering, men oftest følges de retningslinjer, der gælder for områder for blandet bolig- og erhvervsbebyggelse. Støjgrænsen for natperioden er 40 dB (A)¹, og det er den grænse, der gælder for luftledninger [Miljøstyrelsen, 1984].

Det er kun få timer om året, at grænsen på 40 dB(A) vil overskrides, når der måles omkring 100 m fra luftledningen [COWI, 2009].

¹Med et dB (A)-filter vil en måling af lydstyrken ligne det, som det menneskelige øre opfatter [Engineeringtoolbox, 2009]

7.3 Magnetfelters indvirkning på helbredet

Magnetfelter er mistænkt for at have indvirkning på menneskers helbred. Da der er et magnetfelt omkring en strømførende leder, så kan ledninger og kabler muligvis have en effekt på menneskers helbred. Derfor vil der i dette afsnit ses nærmere på, hvor store magnetfelterne og deres styrke er omkring en luftledning og et kabel. Desuden vurderes disses indvirkning på menneskers helbred.

I Tabel 7.1 fremgår det, at magnetfeltstyrken er kraftigere for luftledninger end for kabler (målt 1 m over terræn). Derfor vil eventuelle sundhedsfarer være mindre ved kabler end for luftledninger ved de samme afstande. Intensiteten for kabler falder endda kraftigt efter 10 m og er næsten ubetydelig herefter. Magnetfeltets styrke er afhængig af strømstyrken, der sendes gennem transmissionsledningen.

Luftledning 50-60 kV		Kabel 50-60 kV	
Afstand	Magnetfelt	Afstand	Magnetfelt
0 m	2,5 μT	0 m	1,33 μT
10 m	1,0 μT	10 m	0,04 μT
40 m	0,1 μT	40 m	0,01 μT

Tabel 7.1. Magnetfeltstyrke målt over kabler og under luftledninger 1 m over terræn, for situationer der typisk gør sig gældende. Data fra [Energinet.dk, 2008d]

Verdenssundhedsorganisationen(WHO) har lavet flere undersøgelser omkring magnetfelters indvirkning på kroppen.

Ved akut påvirkninger af magnetfelter på langt over 100 μT sker der biologiske virkninger i kroppen. Magnetfelter inducerer elektriske felter og strømme i kroppen, der ved høj feltstyrke, kan forårsage nerve- og muskelstimulation, samt uro i centralnervesystemet. Dog er den mængde strøm, der er bliver induceret i kroppen af magnetfelter i vores omgivelser, normalt lavere end det der naturligt forekommer i kroppen.²

Der spekuleres i hvilken indvikning magnetfelter har på kroppen over en længere periode. Flere sundhedsorganisationer påpeger at der er en risiko for at forøge antallet af kræfttramte væsentligt ved langtidspåvirkning af magnetfelter på ca. 0,3-0,4 μT [World Health Organization, 2007]. Der forefindes dog ingen videnskabelige dokumentationer af dette.

Da magnetfeltet omkring et kabel er langt under 100 μT i styrke, så vil der ikke

²Hårtørrer og andre elapparater påvirker kroppen i større grad end luftledninger[HEF]

være nogen akut sundhedsrisiko ved at befinde sig lige over et kabel. Derfor kan der kun være en sundhedsfare, ved at sig lige over et kabel i drift gennem længere tid.

Selvom der ikke er dokumenteret nogen sammenhæng mellem helbredsmæssige risici og magnetfelter, arbejder netselskaberne og Energinet.dk efter et forsigtighedsprincip. Dette går ud på der så vidt muligt, undgås at placere distributions- og transmissionsforbindelser i nærheden af bebyggelse.

7.4 Leveringssikkerhed

I Danmark er der en meget høj forsyningssikkerhed og leveringssikkerhed. Rent praktisk betyder dette, at når en elektrisk enhed tilkobles stikkontakten, så vil den få elektricitet og kun i få tilfælde blive afbrudt. I 2007 havde forbrugerne i Danmark elektricitet i stikkontakten 99,99 % af tiden [Energinet.dk, 2009a]. Forsyningssikkerhed er et udtryk for elproducenternes evne til at producere energi til nettet, mens leveringssikkerhed er et udtryk for, hvorvidt nettet kan levere den producerede energi til forbrugeren. Det er vigtigt for alle forbrugere, at både forsyningssikkerheden og leveringssikkerheden er høj, særligt for virksomheder med energikrævende produktion. Sker der et udfald, vil det påvirke virksomhedens produktion og således også økonomien. Dermed har forsyningssikkerheden og leveringssikkerheden en direkte påvirkning af samfundsøkonomien.

De fleste afbrud opstår på de lavere spændingsniveauer, da der på disse niveauer er mange flere forbindelser end på højere niveauer [Dansk Energi, 2007]. I netselskabet HEF, som administrerer spændingsniveauer på 60 kV og under, sker der eksempelvis strømafbrydelser ca. 1-3 gange om måneden. Strømafbrydelser i 400 kV nettet forekommer i gennemsnit hver fjerde år.

Afbrudshyppighed hænger ikke nødvendigvis sammen med afbrudsvarighed, da der er stor forskel på hvor mange kunder, der bliver berørt af et afbrud. Et afbrud i 400 kV nettet påvirker mange flere kunder end et afbrud i fx 60 kV nettet, idet hele Danmarks el-infrastruktur har 400 kV nettet som øverste bindeled. Ud fra 400 kV nettet udspringer de regionale el-net på 132/150 kV og derfra de mindre lokale el-net, og således kan afbruddet påvirke en stor landsdel, fx hele Østdanmark. Sker der en strømafbrydelse i en transformerstation på fx 60 kV nettet, så påvirker det kun en lille landsdel.

De efterfølgende eksempler på strømafbrud illustrerer betydningen af, på hvilket spændingsniveau afbruddet forekommer.

Den 23. september 2003 kl.12:37 blev hele Østdanmark og det sydlige Sverige ramt af strømafbrydelse. Årsagen var et udfald af fire 400 kV-ledninger, to blokke på Ringhals kernekraftværk og udfald af blok 3 i kernekraftværket i Oskarshamn. Det resulterede i et spændingskollaps i Østdanmark og Sydsverige. Ca. kl. 19 var det Østdanske elsystem normaliseret, og forbrugere kunne igen få strøm. 2,4 mio. mennesker blev berørt af afbrydelsen [Energinet.dk, 2009b].

Den 30. januar 2009 kl. 14:00 opstod en fejl på 60/20 kV stationen Vilsted. Kun 23 kunder var berørt af afbrydelsen og alle havde elektricitet igen kl. 14:53 [HEF, 2009].

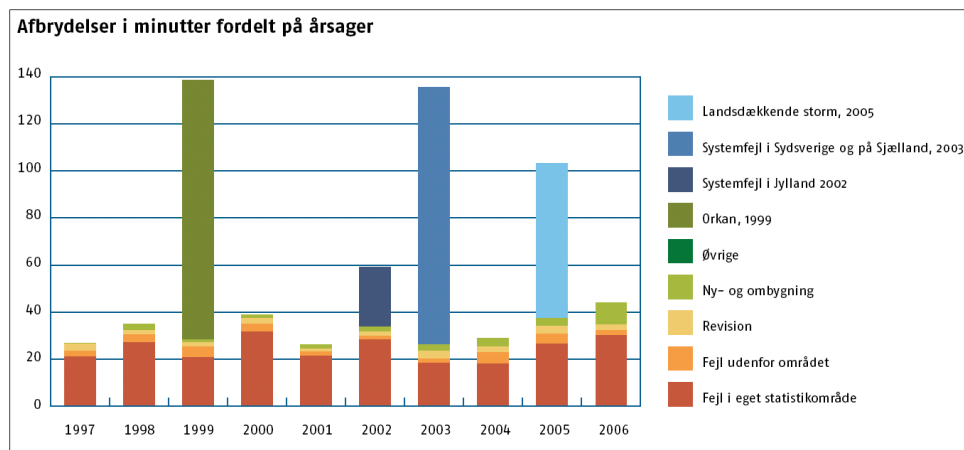
7.4.1 Årsager til afbrud

De hyppigste årsager til strømafbrydelse er dårlige vejrforhold og systemfejl. Systemfejl kan fx være fejl i elproduktionen eller i transformatorstationerne, og det opstår uanset, om forbindelsen er ført som kabel eller luftledning. Dårlige vejrforhold, som fx orkaner, påvirker derimod kun luftledninger. Siden 1985 har orkaner været årsag til strømafbrydelser tre gange [Energistyrelsen, 2007]. Andre eksempler på dårlige vejrforhold kan være tordenvejr, islag og saltstorm.

Islag på luftledninger kan medføre piskninger. Det betyder, at når der er islag på luftledningerne, og det samtidig blæser, så svinger ledningerne op og ned, fordi isen gør lederen tungere. Dette kan foresage korte afbrud, som hos forbrugerne kan ses ved, at lyset blinker. Islag sker i gennemsnit en gang om året.

Saltstorm opstår, når vinden blæser fra havet i tørt vejr. Ved saltstorm, som typisk opstår langs den jyske vestkyst, sætter salt sig på højspændingsmasternes isolatorer. Dette resulterer i krybestrøm langs isolatorerne eller overslag. Saltstorme opstår ca. hvert 3.-4.år. Efter en saltstorm er strøm kapaciteten igennem ledningerne reduceret. Kapaciteten vil først blive normaliseret ved det først kommende regnvejr, hvor saltet afvaskes.

Det ses, med udgangspunkt i de hyppigst forekomne årsager til udfald i elforsyningen, at luftledninger er mere udsatte end tilsvarende kabelanlæg.



Figur 7.3. Afbrydelser i minutter fordelt på årsager i tidsrummet 1997-2006 [Dansk Energi, 2006a].

Som figur 7.3 illustrerer, skyldes de største udfald i el-forsyningen dårligt vejr, specifikt i 1999 og 2005. Disse afbrydelser har stor økonomisk effekt for både virksomheder og husholdninger. Det er svært at fastslå hvilke omskostninger, der er forbundet med et strømsvigt. Der er en række forskellige faktorer, som spiller ind i forhold til disse omkostninger. Det er fx væsentligt, hvornår strømsvigtet opstår og hvor. Der vil være forskel mellem strømsvigt i weekenden og i hverdagen, men også tidsrummet på dagen udgør en vigtig faktor. Strømsvigt har forskellige påvirkninger i forskellige virksomheder. Fx kan der være et enormt tab for frysehuse og fødevarer-virksomheder, da fryse- og kølerum vil slukke, hvorefter fødevarerne fortæres. Derimod vil en produktionsvirksomhed, som er lukket i weekenden, i nogen tilfælde ikke blive mærket af strømsvigt.

Det er meget svært at bestemme de samlede omkostninger, der er forbundet med en strømafbrydelse. Dette kan ses af tabel 7.2, hvor der er givet estimer på omkostningerne af fornævnte strømsvigt d. 23. september 2003 i Østdanmark. Beløbet ligger ca. mellem 200 mio. og 1 mia. kroner, og den store forskel indekorer, at det er meget svært at bestemme disse omkostninger

	Erhverv	Husholdninger	Elsektoren	I alt
Bedste estimat	288,8	101,9	100,0	490,6
Lavt estimat	122,9	50,9	35,0	208,8
Højt estimat	643,8	203,7	150,0	997,5

Tabel 7.2. Det samlede tab ved strømsvigt d. 23. september - mio. kr [Energistyrelsen, 2004].

Ved kabellægning af luftledningsnettet minimeres risikoen for en ødelæggelse af nettet under dårligt vejr, og dermed forbedres leveringssikkerheden. Netselskaberne HEF og Nyfors begrundet deres kabellægning med et ønske om at forbedre leveringssikkerheden [Sørensen, 2009a],[Sørensen, 2009b].

7.5 Opsummering

Ved en kabellægning af en luftledning, vil de visuelle gener mindskes, da kablet vil være under jorden, og derfor ikke kan beskues. Der udsendes ingen støj fra kabler og således vil støjgenerne mindskes ved en kabellægning. På 60 kV niveau er magnetfeltets styrke lavere for kabler end for luftledninger, hvori der løber den samme strøm. Derfor vil den mulige sundhedsrisiko mindskes ved kabellægning. Leveringssikkerheden vil øges, da kabler ikke påvirkes af vejret på samme måde som luftledninger. Alle disse andre konsekvenser taler for en kabellægning af en luftledning.

SI-enheder A

Fysisk størrelse	Symbol	Enhed	Symbol for enhed	Udtrykt i Base Units	Udtrykt i andre enheder
Frekvens (sving/sek)	f	hertz	Hz	s^{-1}	
Vinkelfrekvens	ω	radianfrekvens	rad/s		
Energi	E	joule	J	$kg \cdot m^2/s^2$	$N \cdot m$
Arbejde	W	joule	J	$kg \cdot m^2/s^2$	$N \cdot m$
Elektrisk strøm	I	ampere	A	A	
Effekt	P	watt	W	$kg \cdot m^2/s^3$	J/s
Elektrisk ladning	Q	coulomb	C	$A \cdot s$	
Elektrisk potentiale	V	volt	V	$kg \cdot m^2/A \cdot s^3$	J/C
Spænding	V eller U	volt	V	$kg \cdot m^2/A \cdot s^3$	J/C
Resistans	R	ohm	Ω	$kg \cdot m^2/A^2 \cdot s^2$	V/A
Resistivitet	ρ	ohmmeter	$\Omega \cdot m$		
Konduktans	G	siemens eller mho	S, Ω^{-1} eller $\mathcal{U}$	$A^2 \cdot s^3/kg \cdot m^2$	A/V
Konduktivitet	σ	siemens/meter	S/m eller $\Omega^{-1} \cdot m$		
Induktans	L	henry	H	$kg \cdot m^2/A^2 \cdot s^2$	
Kapacitans	C	farad	F	$A^2 \cdot s^4/kg \cdot m^2$	C/V

Tabel A.1. SI enheder [Jewett/Serway, 2008] og [Beaty, 2006]

Transport af energi i elektriske ledere



Når elektrisk energi transporteres igennem et materiale, sker det ved en elektronudveksling imellem ledermaterialets atomer.

Atomer opfattes som havende en positiv kerne bestående af protoner og neutroner, der er omgivet af en sky af elektroner, som inddeles i skaller omkring kernen. Den yderste skal kaldes ledningsbåndet, og den næstyderste kaldes valensbåndet. Det er kun elektroner i ledningsbåndet, der kan udvekles imellem atomerne. Elektronerne kan i nogen tilfælde hoppe imellem skallerne ved, at atomet enten får tilført eller afgiver energi. Dette kaldes at atomet exciteres.

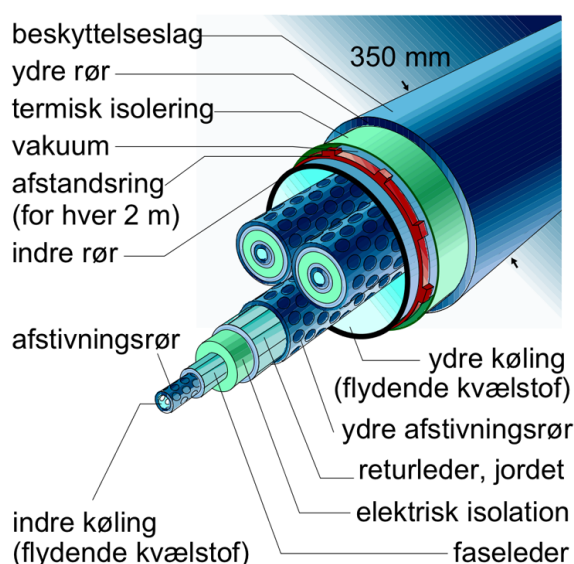
De stoffer der har ledningsbåndet ca. halvt fyldt af elektroner, er gode elektriske ledere. Materialer med denne egenskab er dem vi kender som metaller. Atomernes gitterstruktur er her så tæt opbygget, at de yderste elektroner ikke er bundet til noget bestemt atom. De såkaldte frie elektroner kan derfor bevæge sig tilfældigt rundt i metallet hele tiden. Da elektronerne bevæger sig tilfældigt rundt, vil materialet virke elektrisk neutralt, når det ikke er påtrykt en spænding [Larsen, 2006]. Påtrykkes metallet derimod en spænding, vil elektronernes bevægelse i metallet ensrettes og der vil løbe en elektrisk strøm igennem. Præcist hvor god en leder er til at lede elektrisk ladning, afgøres af den modstand elektronerne møder internt i atomgitteret. Dette kan enten udtrykkes som *specifik modstand* eller *specifik ledningsevne*. Fælles for alle almindelige ledere er, at de alle har en vis specifik modstand ved en given temperatur. Dette beskrives nærmere i afsnit 3.3 på side 21.

For de materialer der betegnes som isolatorer gælder det, at det yderste elektronbånd betragtes som enten helt tomt eller helt fyldt, hvorved stoffets atomer ikke kan udveksle elektroner med hinanden. Samtidigt er energiforskellen mellem valens- og ledningsbåndet så stor, at elektronerne i valensbåndet ikke vil hoppe over i

ledningsbåndet.

Halvledere adskiller sig fra isolatorer ved, at afstanden imellem valens- og ledningsbåndet er så tilpas lille, at stoffet kan blive elektrisk ledende ved tilførelse af energi. Denne energitilførsel resulterer i, at elektroner fra valensbåndet hopper over i ledningsbåndet, hvorved stoffet bliver ledende. Energien kan fx komme fra varme eller et elektrisk felt.

En superleder er et elektrisk ledende materiale, der ved meget lave temperaturer yder en negligerbar modstand. Temperaturen, hvor overgangen fra almindelig leder til superleder finder sted, kaldes for stoffets kritiske temperatur T_c . Superledning blev første gang opdaget ved at nedkøle kviksølv til 4,2 K (-269 °C). I dag findes der superledende legeringer med T_c helt op til ca. 134 K (-139 °C) [Jewett/Serway, 2008]. Udtrykket *superleder* må ikke forveksles med en *perfekt leder*, hvori energitabet er lig nul, da der skal bruges energi på at afkøle superlederen. Figur B.1 viser opbygningen af et superledende kabel.



Figur B.1. En snittegning af et superledende kabel med tre ledere. Kablet køles til ca. -196 °C med flydende kvælstof. Et sådant kabel er kostbart, til gengæld er der praktisk taget intet elektrisk tab i lederen. [Encyclopædi, 2009]

Det hyppigst anvendte ledermateriale til almindelige ledere er kobber, hvis ledningsevne kun overgås af sølv. I luftledninger og kabler anvendes der dog ofte aluminium, der på trods af ringere ledningsevne, alligevel foretrækkes grundet lavere pris og vægt. Dette beskrives nærmere i afsnit 5.1.2.

Litteratur

- Akademiet for de Tekniske Videnskaber, 2001.** Akademiet for de Tekniske Videnskaber. *Dansk infrastruktur i forfald?*, 2001.
- Andersen, 2003.** Poul V. Andersen. *El Ståbi, 3. udgave*. ISBN: 87-571-2395-0, Handbook. Ingeniøren|bøger, 2003.
- Beaty, 2006.** H. Wayne Beaty. *Standard Handbook for Electrical Engineers 15 edition, section 1*. ISBN: 0071441468, Handbook. McGraw-Hill, 2006.
- COWI, 2009.** COWI. *VVM - Det vestjyske højspændingsnet til havmøllepark Horns Rev 2*, 2009.
- Dai Long Trading.** Dai Long Trading. *Aluminium conductor steel reinforced*. www.vnemart.com.vn. Downloadet: 08-04-2009.
- Dansk Energi, 2007.** Dansk Energi. *Dansk Elforsyning Statistik*, 2007.
- Dansk Energi, 2006a.** Dansk Energi. *Dansk Elforsyning Statistik*, 2006a.
- Dansk Energi, 2006b.** Dansk Energi. *Rekommandation 22*. www.danskenergi.dk, 2006. Downloadet: 20-02-2009.
- Dansk Landbrug, 2008.** danskenergi Dansk Landbrug. *Elanlæg på landbrugsjord*, 2008.
- Encyclopædi, 2009.** Den Store Danske Encyclopædi. *Superleder*. www.denstoredanske.dk, 2009. Downloadet: 19-04-2009.
- Energinet.dk, 2008a.** Energinet.dk. *Eltransmissionsanlæg i landskabet*, 2008a.
- Energinet.dk, 2008b.** Energinet.dk. *Den danske vindcase*. www.energinet.dk, 2008. Downloadet: 26-03-2009.
- Energinet.dk, 2008c.** Energinet.dk. *Elinfrastrukturrapport*, 2008c.
- Energinet.dk, 2009a.** Energinet.dk. *Forsyningssikkerhed*. www.energinet.dk, 2009. Downloadet: 25-03-2009.

- Energinet.dk, 2008d.** Energinet.dk. *Om magnetfelter*, 2008d. Downloadet: 04-05-2009.
- Energinet.dk, 2007.** Energinet.dk. *Infoblade om eltransmissionssystemet*, 2007.
- Energinet.dk, 2008e.** Energinet.dk. *Miljørapport 2008*, 2008e.
- Energinet.dk, 2005.** Energinet.dk. *Teknisk katalog 2005/1*. www.el-qa.dk, 2005. Downloadet: 20-02-2009.
- Energinet.dk, 2009b.** Energinet.dk. *Tidligere strømafbrydelser*. www.energinet.dk, 2009. Downloadet: 13-02-2009.
- Energistyrelsen, 2008.** Energistyrelsen. *Nye retningslinjer for kabellægning og udbygning af transmissionsnettet*. Notat, 2008.
- Energistyrelsen, 2007.** Energistyrelsen. *Forsyningssikkerhed i lokale net*, 2007.
- Energistyrelsen, 2004.** Energistyrelsen. *Omkostninger ved elforsyningssvigt*, 2004.
- Energy, 2005.** Leonardo Energy. *The Potential for Global Energy Savings from High Efficiency Distribution Transformers*, 2005.
- Engineeringtoolbox, 2009.** Engineeringtoolbox. *Decibel A, B and C*. www.engineeringtoolbox.com, 2009. Downloadet: 06-05-2009.
- Erhvervs- og Økonomiministeriet, 2005.** Erhvervs- og Økonomiministeriet. *Stærkstrømsbekendtgørelsen afsnit 5*, 2005.
- Gudmundsdottir, 2009.** Unnur Stella Gudmundsdottir. *PhD student, MSc (EE) Energinet.dk & Aalborg Universitet*, 2009.
- HEF, 2009.** HEF. *Driftsforstyrrelser*. www.hef.dk, 2009. Downloadet: 13-02-2009.
- IEA, 2003.** IEA. *World Energy Investment Outlook*, 2003.
- Institute of Energy Technology - Aalborg University.** Institute of Energy Technology - Aalborg University. *Introductory Linear Electric Circuits*. www.iet.aau.dk. Downloadet: 10-04-2009.
- Irwin, 2002.** J. David Irwin. *Basic Engineering Circuit Analysis*. ISBN 0-471-40740-2. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- Jewett/Serway, 2008.** Jewett/Serway. *Physics for Scientists and Engineers*. ISBN: 0-495-11240-2, Handbook. David Harris, 2008.

- Johnson, Johnson, Hilburn, og Scott, 1997.** David E. Johnson, Johnny R. Johnson, John L. Hilburn, og Peter D. Scott. *Electric Circuit Analysis*. ISBN: 0-13-232479-1, Handbook. Prentice-Hall, 1997.
- Larsen, 2006.** Torben Elm Larsen. *Elementær kredsløbs teknik*. ISBN: 87-571-1977-5, Handbook. Nyt Teknisk Forlag, 2006.
- London Metal Exchange, 2009.** London Metal Exchange. *Market data*. www.lme.co.uk/, 2009. Downloadet: 06-05-2009.
- Energinet.dk, 2009.** Nicolaj Nørgaard Petersen Markedschef i Energinet.dk. *Vindmøller: Negative elpriser skal fremme vedvarende energi*. www.energinet.dk, 2009. Downloadet: 06-05-2009.
- Miljø- og Energiministeriet, 1995.** Miljø- og Energiministeriet. *Principper for etablering og sanering af højspændingsanlæg*, 1995.
- Miljøstyrelsen, 1984.** Miljøstyrelsen. *Ekstern støj fra virksomheder*, 1984.
- NKT Cables, 1991.** NKT Cables. *Stål-Aluminium-kabler (ACSR) iflg. canadisk standard*. Datablad på CD-rom, 1991.
- NKT Cables, 2004.** NKT Cables. *Produktkatalog, Elforsyning*, 2004.
- NKT Cables, 2009.** NKT Cables. *Per Sørensen Regionschef Vest NKT Cables A/S*, 2009.
- Nordpool, 2009a.** Nordpool. *About us*. www.nordpoolspot.com, 2009. Downloadet: 10-03-2009.
- Nordpool, 2009b.** Nordpool. *Elspot monthly prices*. <http://www.nordpool.com>, 2009. Downloadet: 06-05-2009.
- Nærføringsudvalget, 2006.** Nærføringsudvalget. *Håndbog om Nærføring*, 2006.
- PEX Association, 2009.** PEX Association. *What is crosslinked Polyethylene and why do we use it*, 2009.
- Plastindustrien, 2008.** Plastindustrien. *Hvad er ekstrudering*. www.plast.dk, 2008. Downloadet: 01-05-2009.
- Sørensen, 2009a.** Gert Sørensen. *Gert Sørensen El-chef Nyfors*. Virksomhedsbesøg hos Nyfors, Brønderslev 14/3-2007, 2009.
- Sørensen, 2009b.** Stefan Sørensen. *Afdelingsleder HEF Net A/S*, 2009.

Transport- og Energiministeriet, 2006. Transport- og Energiministeriet.
Bekendtgørelse af lov om elforsyning, 2006.

Vørts, 1978. S. Vørts. *Elektriske Fordelingsanlæg 3. udgave*. Polyteknisk Forlag, 1978.

Whitaker, 2007. Jerry C. Whitaker. *AC Power Systems Handbook*. ISBN: 0-8493-4034-9, Handbook. CRC Press, 2007.

World Health Organization, 2007. World Health Organization.
Electromagnetic fields and public health. www.who.int, 2007. Downloadet: 14-04-2009.