



KANDIDATNUMMER:

EKSAMEN

EMNENAVN: **Elektriske Anlegg og Høyspenningsteknikk**
(To deler hver på 2 timer og 30 min). For
noen studenter skal de bare løse en av delene. For ordinære
studenter er det hele eksamen.

EMNENUMMER: **ELE3341 hele,ELE3311 del 1, ELE3271 del 2**

EKSAMENDATO: **14.desember 2015**

KLASSE: **13HBINEA** samt nettstudenter og studenter ved
Karlstad Universitet, Høgskolen i Østfold og tidligere studenter i
enten Høyspenningsteknikk eller Elektriske anlegg

TID: **KL0900-1400** Hig og HiØ (0900-11.30 ved kun en av delene)
KL 0815-13.15 KaU (**0815-10.45** ved kun en av delene)
(Noen studenter kan ha innvilget tilleggstid)

EMNEANSVARLIG: **Ian Norheim**
Tor Arne Folkestad

ANTALL SIDER UTLEVERT: Det er til sammen **20** sider med
forside og formelsamling inkludert. Det er totalt **5** oppgaver.

TILLATTE HJELPEMIDLER: Kalkulator og Inkludert
formelsamling i eksamenssettet (7sider med formler til elektriske anlegg og
7 sider med formler til Høyspenningsteknikk)

INNFØRING MED PENN.

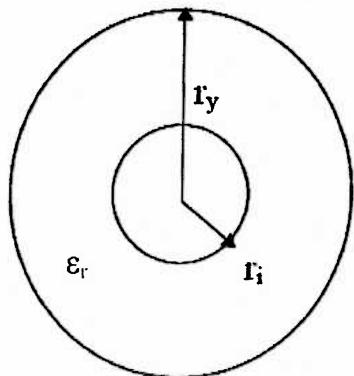
For de som benytter gjennomslagsark husk: Ved innlevering skilles hvit og gul
besvarelse og legges i hvert sitt omslag.

Oppgavetekst, kladd og blå kopi beholder kandidaten.

Husk kandidatnummer på alle ark.

DEL 1. Høyspenningsteknikk (50 %)

Del 1. Oppgave 1 (20 %) Elektrisk feltstyrke og temperaturutvikling i kabel



Figur 1: Skisse av enleder PEX kabel med radius for innerleder r_i og indre radius på ytterkappen r_y . Kabelisolasjonens relative permittivitet er ϵ_r .

En enleder PEX kabel på 1 km benyttes i et trefasenett som driftes med 300 kV linjespenning. Kabelen har følgende tekniske data:

Radius innerleder $r_i=22\text{mm}$

Ytterkappens indre radius $r_y=44\text{mm}$

Innerleders motstand $R = 0.012 \Omega/\text{km}$ ved 20°C

Varmeledningssevne for PEX $\lambda = 0.15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Tapsfaktor tan $\delta=0.012$

Relativ permittivitet $\epsilon_r=3.6$

Kabelens merkestrøm er 900 A

- Beregn maksimal feltstyrke i kabelens isolasjon og beregn kabelens kapasitans per meter.
- Beregn kabelens dielektriske tap per meter og beregn kabelens strømvarmetap per meter når strømmen i kabelen er 900 A.

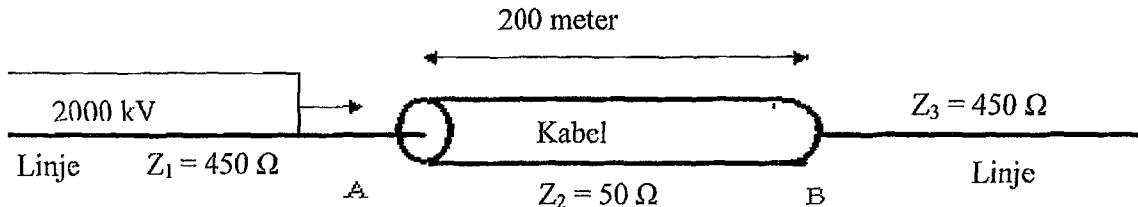
Anta at kabelens strøm er 900 A og at kabelen maksimalt tåler en temperatur i isolasjonen ved innerleder på 80°C i vanlig drift.

- Hvilken omgivelsestemperatur (temperatur i ytterkappen) vil kabelisolasjonen tåle uten at den brytes ned på grunn av varmegjennomslag?

Dersom kabelens isolasjonslag utvides (dvs r_y gjøres større enn 44 mm) vil gjennomslagsspenningen i kabelen øke.

- Forklar hvorfor dette fører til at man må derate kabelen slik at dens merkestrøm må reduseres.

Del 1. Oppgave 2 Lynoverspenninger (15 %)



Figur 2: Lynstrøm slår ned i linje i nærhet av innskutt kabel

Et lynnedsdag slår ned i en luftlinje og forårsaker en spenningsbølge på 2000 kV som vandrer mot en innskutt kabel. Spenningsbølgen som vandrer mot den innskutte kabelen er vist i figur 2. Som en forenkling antas det at denne har fronttid lik null og at den har konstant verdi i hele tidsrommet som betraktes etter at den har slått ned i linjen.

Ved tiden $t=0$ vil spenningsbølgen treffe overgangen mellom linje og kabel i punkt A. Videre vil noe av spenningsbølgen absorberes av kabelen og vandre videre mot punkt B som angir ny overgang mellom kabel og linje. Kabelens løpetid er τ .

Den innskutte kabelens isolasjonsnivå for lynoverspenninger er 1050 kV.

- Beregn refleksjons og absorpsjonskoeffisientene mellom:
 - Linje og kabel ved punkt A (α_1 og ρ_1)
 - Kabel og linje ved punkt A (α_2 og ρ_2)
 Tegn refleksjonsdiagram som dekker forholdene for spenning i punkt A og punkt B i tidsrommet $t = 0$ til $t = 6,5\tau$
- Tegn spenningen i punkt A og punkt B som funksjon av tiden. Bruk at kabelens løpetid er τ . Etter hvilket tidspunkt vil kabelen havarere dersom den ikke vernes mot spenningsbølgen som treffer punkt A?

For å verne kabelen mot lynoverspenninger plasseres avledere med tennspenning 650 kV både i punkt A og punkt B. Anta ideell avledekarakteristikk. Anta fortsatt at spenningsbølgen inn mot punkt A er 2000 kV, og treffer punkt A ved tiden $t=0$.

- Lag refleksjonsdiagram, tilsvarende som i oppgave a), når avlederne i punkt A og punkt B er innkoblet. Beregn avlederstrømmen til avlederne i tidsrommet fra $t = 0$ til $t = 6,5\tau$.

Del 1. Oppgave 3 (15%) Nettstasjon og høyspentsikringer

- a) Tegn et enlinjeskjema for høyspentdelen av en nettstasjon/kiosk med tre felt. Tegn til og med fordelingstransformatoren (men ikke lavspentavgangene). Hvilke valgmuligheter har du for bryterarrangementet i feltet for transformatoren?
- b) Forklar kortfattet hvorfor høyspentssikring i kombinasjon med en sikringslastbryter ofte benyttes til å verne en fordelingstransformator.
- c) I en høyspentsikring benyttes et antall seriekoblede lysbuer til å generere en motspenning som tvinger kortslutningsstrømmen til null. Forklar hvilken fare som oppstår dersom man benytter en høyspentsikring som er dimensjonert for 24 kV systemspenning til å verne en komponent i et nett som driftes med 11 kV.

Del 2: (50%) Elektriske anlegg

Del 2. Oppgave 1 (15%)

Figur 2 viser utsnitt av et 3-fasenett.



Figur 2

Merkedata:

Trafo, T1: $132/22kV$, $5MVA$, $e_r = 1.5\%$, $e_x = 10\%$

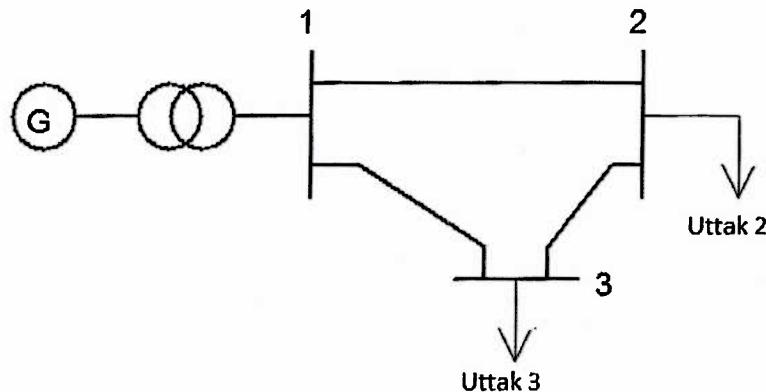
Linje, L: $Z_L = 0.5 + j3 \Omega/fase$

Trafo, T2: $21/0.23kV$, $630kVA$, $e_r = 2.5\%$, $e_x = 5\%$

- a) Beregn Trafo, T2 sin impedanse e_z i ohm referert til 21kV siden av transformatoren.
- b) Spenningen ved samleskinne 4 er målt til $V_4=250$ V. Lastuttaket er da $S_4=500+j400$ (kVA). Hva blir spenningen på samleskinne 1?
- c) Hvor stor aktiv og reaktiv effekt må tilføres samleskinne 1 ?

Del 2. OPPGAVE 2 (35%)

Gitt en krets som vist.



Merkedata:

Generator: $50 \text{ MVA}, 11 \text{ kV}, X_d = 95.04\%$.

Transformator: $75 \text{ MVA}, 10/130 \text{ kV}, X_T = 0.15 \text{ p.u.}$

Linje 1-2: $X_{12} = 33.8 \Omega \text{ /km}$

Linje 1-3: $X_{13} = 27.0 \Omega \text{ /km}$

Linje 2-3: $X_{23} = 16.9 \Omega \text{ /km}$

Uttakene i samleskinne 2 og 3 ekvivaleres med ideelle strømkilder.

- Finn alle reaktansene i p.u. med transformatorspenningene og 75 MVA som referanse .
- Sett opp admittansmatrisen Y for nettet (inklusiv generator og trafo).

Oppgitt: $U_1 = 1.0 \text{ p.u.} \angle 0^\circ, U_2 = 0.98 \text{ p.u.} \angle -2.007^\circ, U_3 = 0.98 \text{ p.u.} \angle -2.136^\circ$

- Beregn strømmen som flyter til uttak 2 med positiv referanse i pilens retning.
- Beregn uttaket av aktiv og reaktiv effekt i ssk. 2. Svaret skal oppgis både i p.u. og i watt og var.
- Finn generatorens induserte spenning E_g i p.u. og generatorstrømmen (statorstrømmen), I_g i p.u. og amperé.
- Hvor stor (aktiv) effekt flyter i linje 1-2 (i p.u. og watt) ?
- Du ønsker en spenningsheving ved samleskinne 2, og setter derfor til et kondensatorbatteri av en passe størrelse. Størrelsen på batteriet er oppgitt i Farad. Forklar hvordan en tilnærmet matematisk fremgangsmåte ville være for å beregne nye spenninger på de tre samleskinnene.

Formelsamling Høyspenningsteknikk 2015

FORMELSAMLING I HØYSPENNINGSTEKNIKK

Elektrostatikk

- Coulomb's lov: $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \vec{r}$

Kraftvirkningen F mellom to ladninger Q_1 og Q_2 med en avstand r imellom

- Permitiviteten ϵ er gitt relativt permitiviteten i vakum: $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$
 ϵ_0 permitivitet i vakum, ϵ_r relativ permitivitet

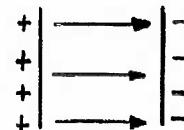
- Det elektriske feltet \vec{E} er en resultant av kraftvirkninger fra ladninger på en positiv enhetsladning q : $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$

- Superposisjonsprinsippet gjelder for både \vec{E} og \vec{F} :

$$\vec{E}_{tot} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$$

$$\vec{F}_{tot} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n$$

- Feltlinjenes retning er definert positivt fra positivt til negativ ladning.



- Elektrisk potensialforskjell (spenning) er definert som: $\Delta V = - \int_{S_i}^{S_o} \vec{E} \cdot d\vec{s}$

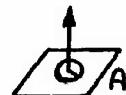
Feltstyrken integreres om en strekning ds mellom de punktene som en vil finne potensialforskjell mellom.

- Energien ved å flytte en ladning q mellom en potensialforskjell ΔV er:

$$W = q \cdot \Delta V$$

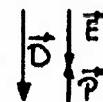
- Flukstettheten \vec{D} er en vektor som angir ladningstettheten i en flate vinkelrett på vektoren:

$$\vec{D} = \frac{Q}{A} \cdot \vec{n}$$



- Permitiviteten sier noe om et stoffs evne til å polariseres. Når stoffet polariseres settets det opp et polarisasjonsfelt motsatt rettet av D -feltet.

$$\vec{E} = \vec{D} + \vec{P}$$



- Sammenhengen mellom \vec{D} og \vec{E} feltet gitt ved:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \text{ pF/m}$$

- Kapasiteten C er gitt ved:

$$Q = \text{lading}$$

$$U = \text{spenning}$$

$$C = \frac{Q}{U}$$

- Gauss theorem:

$$\oint \vec{D} \cdot \vec{n} \cdot dA = Q$$

n er en enhetsnormalvektor rettet

vinkelrett på flaten dA

A er flatearealet av en lukketflate som omkranser et volum med ladning Q

GRENSEBETINGELSER:

- Tangensiellkomponenten av de elektriske feltstyrkene på hver side av en grenseflate hvor det ikke ligger ladning er like.
- Normalkomponenten av flukstettheten på hver side av en grenseflate hvor det ikke ligger ladning må være like.
- Elektrisk flukstetthet fra en punktladning :
- Elektrisk flukstetthet fra en uendelig lang sylinder med radius r , q er ladning pr lengdeenhet :

$$\vec{E}_{t1} = \vec{E}_{t2}$$

$$\vec{D}_{n1} = \vec{D}_{n2}$$

$$\vec{D} = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

$$\vec{D} = \frac{q}{2\pi r}$$

SYLINDERKONDENSATOR ELLER KABEL MED :

1. Dielektrika :

q = ladning pr lengdeanhet
 r_i = ytterlederens indre radius
 r_o = innerlederens ytre radius
 V = spenning mellom leder og ytterkappe

$$V = + \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_o}{r_i}$$

- Feltstyrke :

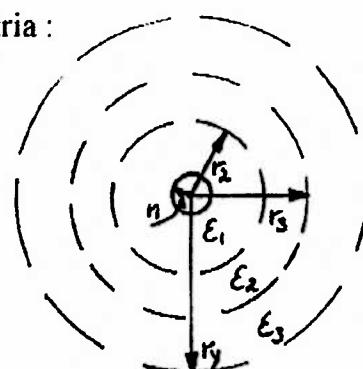
$$E(r) = \frac{V}{r \cdot \ln \frac{r_o}{r_i}}$$

- Kapasitet :

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{r_o}{r_i}}$$

3. Dielektria :

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$



$$E = \frac{C \cdot U}{2\pi\epsilon_1 r} \quad r_i < r < r_2$$

$$E = \frac{C \cdot U}{2\pi\epsilon_2 r} \quad r_2 < r < r_3$$

$$E = \frac{C \cdot U}{2\pi\epsilon_3 r} \quad r_3 < r < r_y$$

PLATEKONDENSATOR MED :

- 1 Dielektrika
- d = avstanden mellom elektrodene
- A = arealet av elektrodene

$$E = \frac{V}{d}$$

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

- 3 Dielektrika

$$C = \frac{1}{C_1 + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

$$D = \frac{Q}{A} = \frac{CU}{A}$$

$$E_1 = \frac{C \frac{U}{A}}{\epsilon_1} = \frac{U_1}{d_1}$$

$$E_2 = \frac{C \frac{U}{A}}{\epsilon_2} = \frac{U_2}{d_2}$$

$$E_3 = \frac{C \frac{U}{A}}{\epsilon_3} = \frac{U_3}{d_3}$$

KULEKONDENSATOR

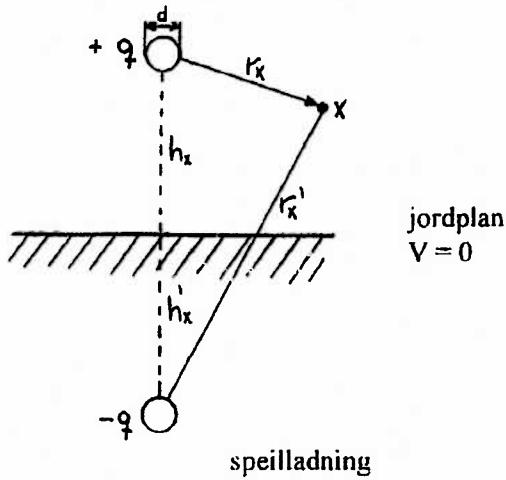
- 1 Dielektrika

$$E(r) = \frac{C \cdot U}{4\pi \epsilon r^2}$$

$$C = 4\pi \epsilon \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1}$$

$$V = \frac{Q}{4\pi \epsilon} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right]$$

EN LEDER OVER JORDPLAN

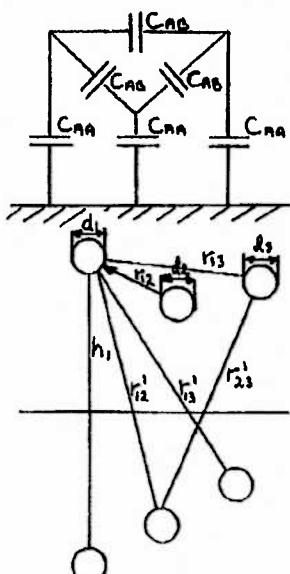


$$\text{Potensialet i et punkt } x \text{ er: } V_x = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{r_x'}{r_x}$$

$$V_{\text{leder}} = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{h_x + h_1}{\frac{d}{2}} = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{4h_x}{d}$$

$$C = \frac{2\pi \epsilon}{\ln \frac{4h}{d}}$$

TREFASE REVOLVERT LEDER



Driftskapasitet:
pr. meter

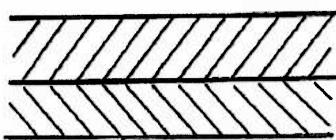
$$C_{AA} = \frac{2\pi \epsilon}{\ln \left[\frac{4h}{d} \cdot \left(\frac{r'}{r} \right)^2 \right]}$$

$$C_D = \frac{2\pi \epsilon}{\ln \left[\frac{4h}{d} \cdot \frac{r'}{r} \right]}$$

$$d = \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3} \quad r = \sqrt[3]{r_{12} \cdot r_{23} \cdot r_{31}}$$

$$h = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} \quad r' = \sqrt[3]{r_{12}' \cdot r_{23}' \cdot r_{31}'}$$

LIKESPENNINGSKONDENSATOR MED TO DIELEKTRIKA



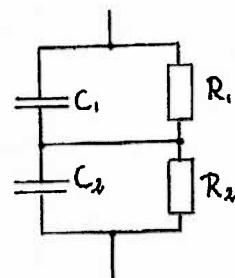
ϵ_1, ρ_1 Modell

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\frac{\rho_1 \cdot \epsilon_1}{\rho_2 \cdot \epsilon_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$\rho_1, \epsilon_1 > \rho_2, \epsilon_2 \Rightarrow D_1 > D_2 \Rightarrow C_{\text{tot}} = C_1 \frac{U_1}{U_{\text{tot}}}$$

$$\rho_2, \epsilon_2 > \rho_1, \epsilon_1 \Rightarrow D_2 > D_1 \Rightarrow C_{\text{tot}} = C_2 \frac{U_2}{U_{\text{tot}}}$$



TOWNSEENDS OVERSLAGSKRITERIUM, for elektro positiv gass

E : feltstyrke

p : gasstetthet

$$\delta (e^{ed} - 1) = 1$$

1. Ionisasjonskoeff.

- Sansynligheten for at et fritt elektron (fritt) slår ut et nytt elektron.

$$\alpha = p \cdot f(\frac{E}{p})$$

2. Ionasjonskoeff.

- Sansynligheten for at et positivt ion skal slå ut et elektron fra katoden.

$$\delta = g(\frac{E}{p})$$

OVERSLAGSKRIT. FOR ELEKTRONEGATIV GASS (SF₆)

η : tilknytningskoeff. som angir sannsynligheten for at et fritt elektron blir fangetopp av et gassmolekyl og danner et negativt ion.

$$\frac{\delta \cdot \alpha}{\alpha - \eta} [e^{(\alpha - \eta)d} - 1] = 1$$

PASCHEN'S LOV $V_{gi} = f(p \cdot d)$

- Den relative permitiviteten ϵ kan deles opp i en realdel og en imaginær del hvor den imaginære delen er et uttrykk for resonansfrekvens og tap.

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$$

tan δ kalles tapsfaktor og et uttrykk for hvor utsatte materialet er for dielektriske tap.

$$\epsilon' \approx \epsilon_r \tan \delta$$

Utviklet dielektrisk tap pr volumenhet: $dp = \omega \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_r \tan \delta \cdot E^2 dV$

$$\omega = 2 \pi f, \quad f = \text{frekvens}$$

E : feltstyrke dV : volumenhet

- Fouriers lov for varmeledning i et plan: $Q = -\lambda \cdot A \frac{dT}{dx}$

Q : varme

λ : varmeledningsevne

A : tverrsnittet varmen ledes igjennom

$\frac{dT}{dx}$: temperaturgradienten

- Generert dielektrisk effekt i en kabel pr lengde enhet :

$$P = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta U^2}{L n} \frac{2\pi}{r_y}$$

- Temp. T_i på innerleder som følge av bare dielektriske tap :

$$T_i = T_y + \frac{\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta U^2}{\lambda}$$

- Temp T_i på innerleder som følge av bare strømvarmetap ($i^2 \cdot r$) :

$$T_i = T_y + \frac{i^2 \cdot r}{2\pi \lambda} \ln \frac{r_y}{r_i}$$

r : motstanden pr lengde enhet

ISOLATOR HENGEKJEDE

n = totalt antall ledd

x = ledd nr. x

U_x = spenningen fra jord til ledd x

U = spenning mellom linje og jordet travers

K = kapasitet mellom kappe og bolt

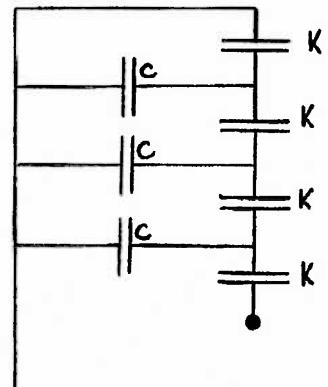
C = kapasitet mellom kappe + bolt og jord

$$U_x = U \cdot \frac{\sinh(\gamma \cdot x)}{\sinh(\gamma \cdot n)}, \quad \sinh \frac{\gamma}{2} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C}{K}}$$

$$\sinh(x) = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})$$

$$\sinh^{-1}(x) = \ln[x + \sqrt{x^2 + 1}]$$

Travers



KONDENSATORGJENNOMFØRING

r : radius til et folie lag (elektrode)

$$r \cdot l = r_y \cdot l_y$$

l : lengde av et folielag

r_y : radiusen til ytre jordet flens mot vegg

l_y : lengden av ytre jordet flens

(Forenkling hvert folielag betraktes som en platekondensator)

E_a : aksial feltstyrke

$$E_a = \frac{\Delta U}{\Delta r} = 2 \frac{\Delta U}{\Delta r} \cdot \frac{\Delta r}{\Delta L}$$

$$E_a = 2 E_r \frac{\Delta r}{\Delta L} = 2 E_r \frac{r^2}{r_y \cdot l_y}$$

BØLGEIMPEDANSSEN FOR EN TAPSFRIT LEDER

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$U_{REF} = \rho U_{inn}$$

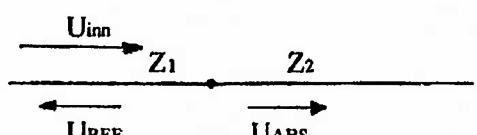
$$U_{ABS} = \alpha U_{inn}$$

ρ : refleksjonskoeff.

α : absorbasjonskoeff.

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$\alpha = 1 + \rho = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$$



BØLGEHASTIGHETEN

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$H(t) = \begin{cases} 1 & (t) > 0 \\ 0 & (t) \leq 0 \end{cases}$$

INDUSERT LYNOVERSPEKKING U_o

(For linjer uten gjennomgående jordline)

$$U_o = \frac{30h}{x} k I_o$$

h = lederens høyde over bakken

x = avstanden mellom nedslagssted og leder

I_o = lynstrømmens maksimalverdi

$k = 1.07 - 1.38$

DIFF.LIKNING

$$\frac{d^2 U_C}{dt^2} + \frac{1}{LC} U_C = \frac{\sqrt{2}}{LC} U \cos \omega t$$

Løsning:

$$U_C(t) = A \cos \frac{t}{\sqrt{LC}} + B \sin \frac{t}{\sqrt{LC}} - \frac{\sqrt{2}}{1-\omega^2 LC} U \cos \omega t$$

ENERGI W lagret i en induktans L :

$$W = \frac{1}{2} L i^2$$

----- kapasitet C :

$$W = \frac{1}{2} C U^2$$

Fouriers lov om varmeledning: $P = -\lambda A \cdot (dT/dx)$

- A:tverrsnittet varmen ledes igjennom
- λ :varmeledningsevnen til isolasjonsmaterialet
- dt/dx : temperaturgradienten i varmestrømmens retning
- P: Effektutvikling

P: Dielektriske tap i [W/m] kabel :

$$P = \omega \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta}{\ln \frac{r_y}{r_i}} U^2$$

U:spenningens effektivverdi mellom kappe og innerleder [V]

ω : vinkelfrekvens i [rad/s]

$\tan \delta$: tapsfaktor

r_y : ytterkappes indre radius

r_i : innerleder radius

ϵ : dielektrisitetskonstant

Temperatur ved radius r i en kabel med gitt temperatur på ytterkappe T_y og varmeledning λ i isolasjonsmaterialet:

$$T(r) = T_y + \frac{P}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_y}{r}$$

P er produsert effekt ved innerleder.

For en tilnærmet modell av varmeledning i en kabel kan man anta at effektutviklingen ved innerleder P er gitt ved $P = \text{strømvarmetap} + \text{halvparten av dielektriske tap}$.

Strømvarmetap målt i [W/m]er : $R \cdot I^2$

hvor I er strømmen i ampere og R er motstanden i ohm/meter.

FORMLER i Elektriske anlegg 2015

Linjeparametre (3-fasenett) forutsetter revolverte linjer og like diametere på faselinjer:

D_{eq}: Geometrisk midlere faseavstand

D_s: Geometrisk midlere radius

D_{s'}: Geometrisk midlere tilsynelatende radius

r' : Tilsynelatende radius

r : lederradius

h: Geometrisk midlere fasehøyde over jordplan

D': Geometrisk midlere faseavstand mellom ladninger og speilladninger

C_n: Forenklet beregning av driftskapasitansen

C_{ab}: Kapasitet mellom faseledere for revolvert linje i modell med speilladning.

$$r' = r \cdot e^{-\frac{h}{r}} \approx 0.78r$$

Midlere induktans pr. fase: $L_a = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s}\right) [H/m]$ hvor $D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$

Forenklet beregning av driftskapasitans. Tar ikke hensyn til jordplanets innvirkning men vil gi god nok anslagsverdi for beregninger:

$$C_n = \frac{2\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s}\right)} [F/m]$$

Midlere kapasitans mellom faseledere og jord beregnet med speilladning:

$$C_{aj} = \frac{2\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{\ln\left[\frac{2h}{D_s} \left(\frac{D'}{D_{eq}}\right)^2\right]} [F/m]$$

Midlere driftskapasitet beregnet med speilladninger:

$$C_d = \frac{2\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{\ln\left[\frac{2h}{D_s} \left(\frac{D'}{D_{eq}}\right)\right]} [F/m]$$

$$3C_{ab} = C_d - C_{aj}$$

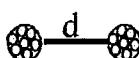
Simplex
(Én ledet pr.fase)



$$D_s = r$$

$$D'_s = r'$$

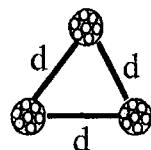
Duplex
(To ledere pr.fase)



$$D_s^{duplex} = \sqrt{D_s \cdot d}$$

$$D_s'^{duplex} = \sqrt{D'_s \cdot d}$$

Triplex
(Tre ledere pr.fase)



$$D_s^{triplex} = \sqrt[3]{D_s \cdot d^2}$$

$$D_s'^{triplex} = \sqrt[3]{D'_s \cdot d^2}$$

Motstand R:

$$R = \rho \frac{l}{A} [\Omega]$$

Spesifikk motstand ρ [$\Omega \cdot m$]

Temperaturkorrigering for ledningsmateriale: $R_T = R_{REF} (1 + \alpha(T - T_{REF})) [\Omega]$
Temperatur koeffisient for spesifikk motstand α [$1/^\circ C$]

Langspenningsfall:

$$\Delta V = \frac{1}{V_R} (P \cdot R + ((Q - Q_C) \cdot X))$$

Tverrspenningsfall:

$$\Delta V = \frac{1}{V_R} (X \cdot P - ((Q - Q_C) \cdot R))$$

Tap:

$$P_{tap} = R \cdot I_r^2 = R \cdot \frac{S^2}{V_r^2} = \frac{R}{V_r^2} (P^2 + Q^2)$$

Reaktive tap:

$$Q_{tap} = X \cdot I_r^2 = X \cdot \frac{S^2}{V_r^2} = \frac{X}{V_r^2} (P^2 + Q^2)$$

Pr. unit-impedans trefase:

Indeks N for nominell verdi (base verdi)

Gitt trefase S_N [MVA] og linjespenningen U_N [kV]:

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} [\text{kA}]$$

$$Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} [\Omega]$$

$$\vec{Z}_{(p.u.)} = \frac{\vec{Z}_{(\Omega)}}{Z_{N(\Omega)}} = \frac{\vec{Z}_{(\Omega)}}{\left(\frac{U_N^2}{S_N}\right)}$$

$$\vec{I}_{(p.u.)} = \frac{(S_{p.u})^*}{(\vec{U}_{p.u})^*}$$

$$\vec{I}_{(p.u.)} = \frac{(P_{p.u})}{(\vec{U}_{p.u} \cdot \cos \varphi)} \angle -\varphi$$

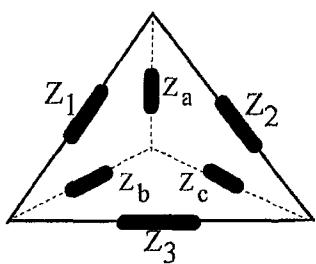
Omregning av p.u.-verdier til en ny felles referanse:

$$\vec{Z}_{nyref}(p.u.) = \vec{Z}_{original}(p.u.) \cdot \frac{S_{nyref}}{S_N} \cdot \left(\frac{U_N}{U_{nyref}} \right)^2$$

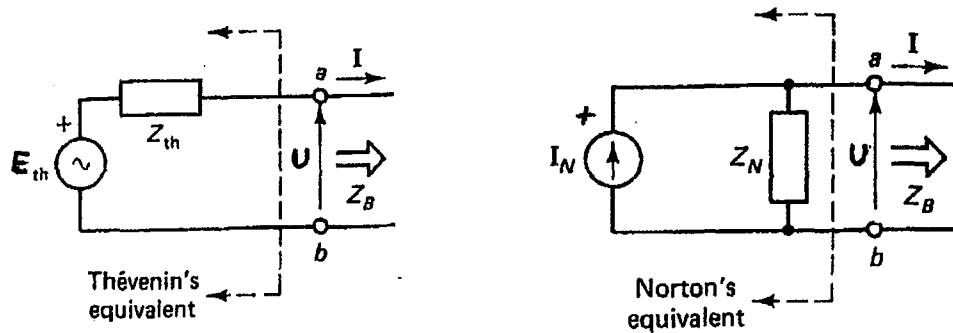
Tilsynelatende effekt:

$$\vec{S} = \vec{U} \cdot \vec{I}^* = P \pm jQ \quad (\text{p.u.})$$

Trekant-stjerne transformering:



$$\bar{Z}_a = \frac{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_{tot}} , \quad \bar{Z}_b = \frac{\bar{Z}_1 \bar{Z}_3}{\bar{Z}_{tot}} , \quad \bar{Z}_c = \frac{\bar{Z}_2 \bar{Z}_3}{\bar{Z}_{tot}} , \quad \text{hvor: } \bar{Z}_{tot} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3$$

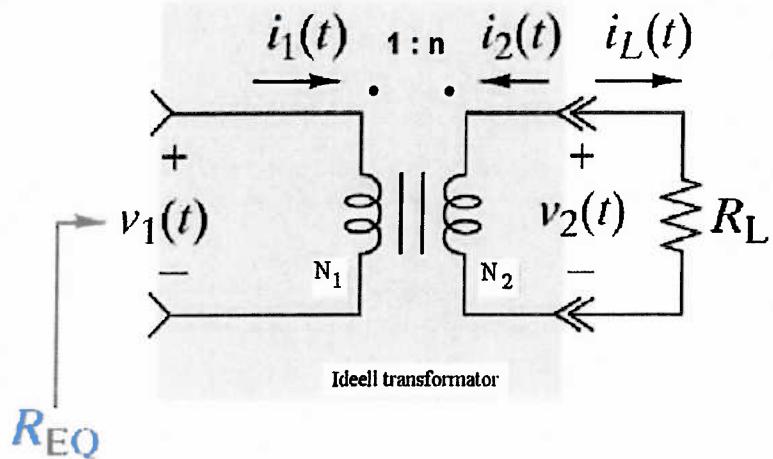


Skal Norton og Thevenin ekvivalentene være ekvivalenter for hverandre må følgende oppfylles:

$$Z_{th} = Z_N$$

$$E_{th} = Z_N \cdot I_N$$

Ideell transformator:



Det er ikke noe effekttap og lekasjefluks i transformatoren og vindingene har felles magnetisk felt/fluks.

$$\text{Omsetningsforholdet } n = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\text{Ekvivalent inngangsresistans: } R_{eq} = \left(\frac{1}{n}\right)^2 \cdot R_L$$

$$\text{Spenninger og strømmer: } \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_L}{I_1} = \frac{1}{n}$$

Prosedyre ved maskestrømsanalyse for oppsett av likningssystemet: $Z \cdot I = U$

- Ved maskeanalyse ønsker vi spenningskilder. Konverter eventuelle strømkilder til spenningskilder hvis det lar seg gjøre.
- Navngi masker (f.eks: 1, 2, ...)
- Tilordne maskestrømmer med urviseren (I_1, I_2, \dots)
- Sett opp Kirschoffs spenningslov (KVL) rundt hver maske.
- Ordne likningsettene slik at dere samler impedansene foran hver maskestrøm på den ene siden av hver linje (=) tegnet og setter spenningskildene i masken på den andre siden.
- Sett systemet på matriseform:
I er da vekturen til maskestrømmene, U er drivende spenningskilder i kretsen.

Prosedyre ved direkte inspeksjon:

- Forutsetter at alle kilder er spenningskilder
 - Impedansmatrise Z blir da :
 - Z_{ii} : summen av impedanser for maske i
 - Z_{ij} : summen av impedanser som maske i og j har felles.
 - Diagonalen med Z_{ii} har positive fortegn
 - De andre plassene i Z matrisen har negative fortegn.
 - $\sum U_i$ er summen av spenningskilden i maske i hvor spenningskildene har positivt fortegn hvis de driver maskestrømmen med urviseren.
- $$\begin{bmatrix} Z_{11} & -Z_{12} & \dots & -Z_{1n} \\ -Z_{21} & Z_{22} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Z_{1n} & \dots & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum U_1 \\ \sum U_2 \\ \dots \\ \sum U_n \end{bmatrix}$$

Prosedyre ved node/knutepunktsanalyse for oppsett av likningssystemet: $I=Y \cdot U$

- Ved knutepunktsanalyse ønsker vi strømkilder. Konverter eventuelle spenningskilder til strømkilder hvis det lar seg gjøre.
- Velg jord som referanseknutepunkt/node .
- Gjør om impedanser til admittanser.
- Navngi knutepunkt (f.eks; 1,2,...)
- Tilordne knutepunktspotensialer (f.eks: V_1, V_2, \dots)
- Sett opp Kirschoffs strømlov (KCL) hvert knutepunkt, men ikke for referanse node.
- Ordne likningssettene slik at dere samler admittansene foran hvert nodepotensiale på den ene siden av hver (⇒) tegnet og setter strømkildene som mater inn i knutepunktet på den andre siden.
- Sett systemet på matriseform:
 V er da vektoren til nodepotensialene, I er drivende strømkilder i kretsen.

Prosedyre ved direkte inspeksjon:

- Forutsetter at alle kilder er strømkilder
 - Admittansmatrisen Y blir da :
 - Y_{ii} :summen av admittanser direkte tilknyttet knutepunkt i
 - Y_{ij} :summen av impedanser som direkte forbinder knutepunkt i og j.
 - Diagonalen med Y_{ii} har positive fortegn
 - De andre plassene i Y matrisen har negative fortegn.
 - $\sum I_i$ er summen av strømkilder som mater direkte inn i knutepunkt i hvor strømkildene er positive hvis de har strømretning inn i knutepunktet.
- $$\begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \dots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & Y_{22} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{1n} & \dots & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum I_1 \\ \sum I_2 \\ \dots \\ \sum I_n \end{bmatrix}$$

Ledningsförluster:

$$P_f = 3 * R * |I_H|^2$$

$$Q_f = 3 * X * |I_H|^2$$

I_H är den ström som flyter genom den aktuella ledaren.

Spänningssfall över ledningar:

$$V_{1h} = V_{2h} + \sqrt{3}\Delta V_f$$

ΔV_f är spänningssfallet över en ledning som man får ut från ekvivalentschemat för en fas.

Det kan annars vara mycket enkelt att glömma att man ska multiplicera ΔV_f med $\sqrt{3}$ för att få svaret i huvudspänning. Index h står för huvudspänning och f för fasspänning.

Effekter:

$$P = \sqrt{3} * |U_h| * |I_h| * \cos(\varphi)$$

$$Q = \sqrt{3} * |U_h| * |I_h| * \sin(\varphi)$$

$$S = \sqrt{3} * U_h * I_h^*$$

I_h^* betyder att strömmen skall konjugeras.

Geometriskt medelavstånd för avståndet mellan laddningar och spegling för trefase planoppheng:

$$D' = \sqrt[3]{(4h^2 + D_{12}^2) * \sqrt{4h^2 + 4D_{12}^2}}$$

h = ledarens höjd över marken

D_{12} = fasavstånd mellan ledare 1 och 2 och ledare 2 och 3. Fasavstånd ledare 1 och 3 är $2D_{12}$