

Laskimia saa käyttää!

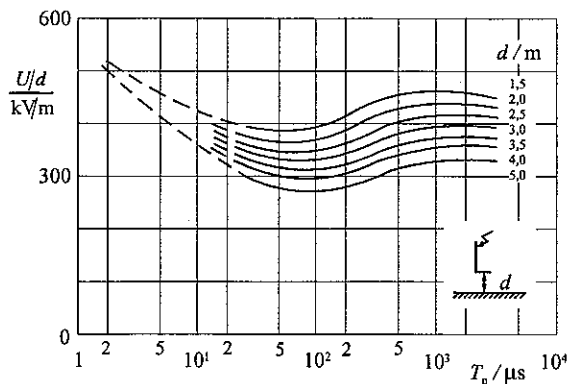
1. Eräessä koejärjestelyssä tutkittiin Townsend-mekanismeilla tapahtuvaa läpilyöntiä. Säädettävän testielektrodivälän sisältävässä kaasusäiliössä oli ilmaa 10 kPa paineessa. Elektrodienvälän ollessa 1 cm tapahtui elektrodivälissä läpilyönti 5 kV jännitteellä. Laske, mikä olisi läpilyöntijännite samalla paineella samassa elektrodivälissä, kun elektrodienvälän etäisyydeksi säädetään 2 cm.

$$\text{Townsend-tyyppisessä läpilyönnissä läpilyöntijännite noudattaa yhtälöä } U_b = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}}$$

ja ilmalle kertoimet A ja B ovat $A=11,3 \text{ Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$ ja $B=275 \text{ V} \cdot \text{Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$. (6 p.)

2. Öljypaperieristeisen kaapelin johtimen säde $r_1=20 \text{ mm}$ ja vaipan säde $r_2=70 \text{ mm}$. Öljypaperieristeeseen suhteellinen permittiviteetti ϵ_r on 3.
- a) Kuinka suuri on öljypaperieristeessä esiintyvä suurin kentänvoimakkuus, kun johtimen ja maadoitetun ulkovaipan välisen jännitteen huippuarvo on 140 kV? (3 p.)
- b) Kun öljypaperieristeessä on 0,1 mm paksuinen litteä ilmaontelo virtajohtimen pinnalla, alkavat ontelossa osittaispurkaukset elektrodienvälisen vaihtojännitteen tehollisarvon arvolla 100 kV. Kuinka suurella jännitteellä (tehollisarvo) purkaukset olisivat alkaneet, jos vastaava ontelo olisikin ollut öljypaperieristeessä ulkovaipan sisäpinnalla? (3 p.)
3. a) Mitä ovat eristysrakenteen dielektriset häviöt ja mitkä tekijät vaikuttavat dielektristen häviöiden suuruuteen? Mitä kuvaa häviökerroin $\tan \delta$ ja miten se voidaan mitata? (3 p.)
- b) Eristysrakenne muodostuu kahdesta rinnan kytketystä kondensaattorista, joiden kapasitanssit ovat $C_1 = 100 \text{ nF}$ ja $C_2 = 200 \text{ nF}$ sekä häviökulmat $\delta_1 = 4,6^\circ$ ja $\delta_2 = 5,7^\circ$. Elektrodienvälisen vaihtojännitteen vaikutus on 50 Hz vaihtojännite, jonka tehollisarvo on 6 kV. Laske koko eristysrakenteen dielektriset häviöt ja kapasitiivinen loisteho. Mikä on koko eristysrakenteen häviökerroin? (3 p.)
4. a) Selosta ne fysikaaliset syyt, joiden vuoksi ilmaeristeisen tanko-taso-eristysvälin sähkölujuus riippuu jännitteen rasisajasta oheisen kuvan 1. mukaisesti. (3 p.)
- b) Selosta miten ja miksi ilmaeristeisen tanko-taso-eristysvälin jännitelujuus on salamasyöksyjännitteellä erilainen positiivisella ja negatiivisella napaisuudella. (3 p.)

Kuva 1. Ilmaeristeisen tanko-taso-
kipinävälin sähkölujuuden riippuvuus
testauspulsin ajasta huippuarvoon
positiivisella kytkeänsyöksyjännitteellä.



5. a) Selosta mihin seikkoihin perustuu SF₆-kaasun käyttö eristysaineena. Mitä etuja ja haittoja sillä on? Mitä pitää ottaa huomioon SF₆-eristeisiä rakenteita suunniteltaessa? (3 p.)
- b) Selosta mitkä seikat vaikuttavat öljyeristysvälien läpilyöntilujuuteen ja miten? (3 p.)

Anodille tulevan virran on Townsend-tyyppisessä purkauksessa todettu noudattavan yhtälöä

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1)$$

ja kertoimelle α pätee $\alpha = Ap \cdot e^{-Bpd/U}$ (2)

- a) Miten saat johdettua yhtälön läpilyöntijännitteelle Townsend-tyyppisessä läpilyönnissä? (3 p.)
b) Eräässä koejärjestelyssä tutkittiin Townsend-mekanismilla tapahtuvaa läpilyöntiä. Säädetävän testielektrodivälin sisältävässä kaasusäiliössä oli ilmaa 10 kPa paineessa. Elektrodienvälin ollessa 1 cm tapahtui elektrodivälissä läpilyönti 5 kV jännitteellä. Laske, mikä olisi läpilyöntijännite samalla paineella samassa elektrodivälissä, kun elektrodienväliä säädetään 2 cm. Ilmalle kertoimet A ja B ovat $A=11,3 \text{ Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$ ja $B=275 \text{ V} \cdot \text{Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$.
(3 p.) (Huom! Pisteet tulevat laskutoimituksesta, ei pelkästä tuloksesta, vaikka se olisi oikeinkin.)

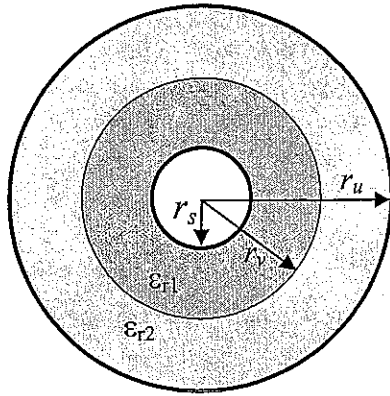
- a) Selosta lyhyesti fysikaaliset ilmiöt, joiden voimakkuutta edellä olevassa yhtälössä (1) esiintyvät kertoimet α ja γ kuvaavat. (2 p.)
b) Selosta, missä olosuhteissa ilmaeristysvälin läpilyönti voi tapahtua puhtaalla Townsend-mekanismilla? Milloin läpilyöntimekanismi eroaa Townsend-läpilyönnistä ja miksi? (3 p.)
c) Miten elektrodienvälin napaisuus vaikuttaa ilmaelektrodivälin läpilyöntijännitteen suuruuteen puhtaassa Townsend-tyyppisessä läpilyönnissä? (1 p.)

a) Lieriösymmetrinen läpivientieristysrakente on toteutettu kääntöpuolella olevan kuvan 1. mukaisesti muodostamalla kahdesta eri eristemateriaalista sisäkkäiset lieriöt. Miten eristemateriaalit kannattaa sijoittaa eristysväliin, jos niiden suhteelliset permittiviteetit ovat 2,25 ja 4? Miksi? (2 p.)

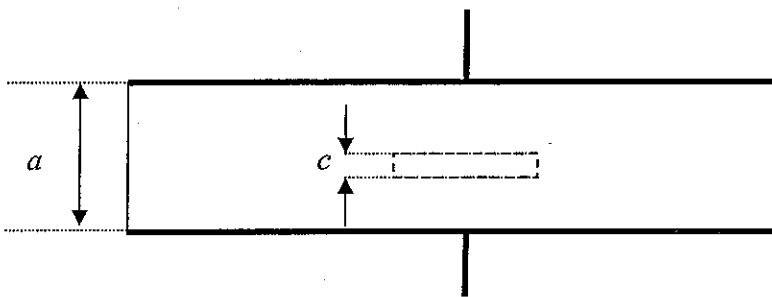
b) Tarkastellaan kohdan a-mukaista eristysrakennetta, jossa sisäelektrodin säde r_s on 10 mm ja ulkosäde r_u on 32 mm. Eristekerrosten paksuudet on valittu siten, että koko eristysvälin yli vaikuttava jännite jakautuu näiden kahden eri kerroksen yli suunnilleen tasan. Tällöin eristemateriaali vaihtuu toiseen säteen arvolla $r_v=21$ mm. Eristysrakenteen valmistusvaiheessa eristekerrosten rajalle on johonkin kohtaan jäänyt pieni litteä ilmarako. Oletetaan ilmaraon paksuudeksi n. 0,1 mm ja ilmaraon sisältävän ilmaa normaalipaineessa. Arvioi, millä koko eristysrakenteen yli olevan vaihtojännitteen tehollisarvolla alkavat jännitettä nostettaessa osittaispurkaukset tässä ilmaraossa? (4 p.)

4. Kääntöpuolella olevan kuvan 2. mukaisen lieriönmuotoisen eristekoekappaleen sisällä oletetaan olevan litteä kenttää vastaan kohtisuorassa oleva kaasuontelo, jonka paksuutta c ei tunneta. Koko lieriön paksuus a on 6 mm. Kaasuontelossa oletetaan olevan ilmaa normaalipaineessa. Kun koko koekappaleen yli olevaa vaihtojännitettä U hitaasti nostetaan, alkavat osittaispurkaukset ontelossa, kun U ylittää 8 kV. Purkaustaajuus on tällöin 200Hz. Arvioi, mitä suuruusluokkaa ontelon paksuus on, jos ontelossa mahdollisesti esiintyviä jäännösvarauksia ei tarvitse ottaa huomioon. Eristemateriaalin suhteellinen permittiviteetti on 4. (6 p.)

Tehtäviin liittyvät kuvat 1 ja 2 ovat tehtäväpaperin kääntöpuolella. Sieltä löydät myös Paschenin käyrän ilmalle (kuva 3).



Kuva 1. Kahdesta eri eristemateriaalista valmistettu lieriöeristerakenne



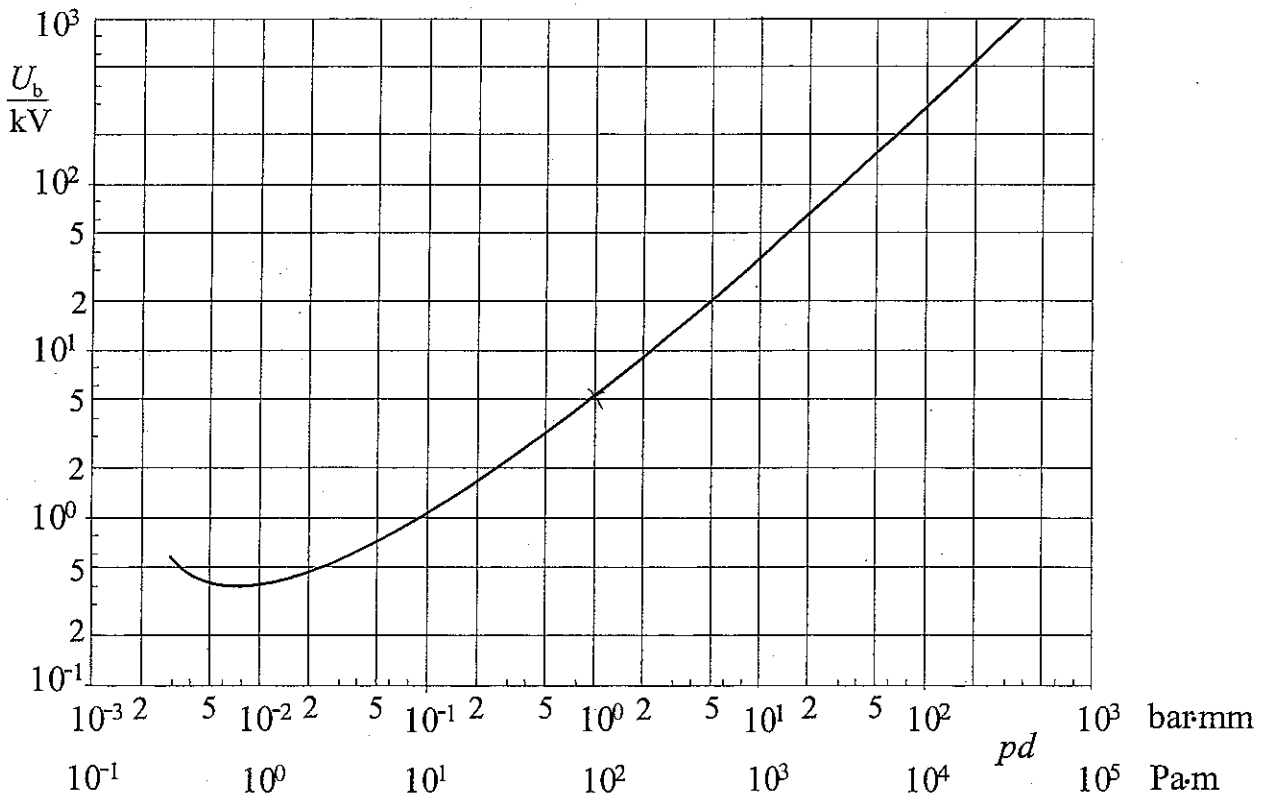
eristeen:

halkaisija $D = 30 \text{ mm}$
 paksuus $a = 6 \text{ mm}$

ontelon:

korkeus $c = ?$
 halkaisija d selvästi suurempi kuin korkeus

Kuva 2. Osittaispurkausontelon sisältävä tasoeristysrakente.



Kuva 3. Paschenin käyrä ilmalle.

JOUNI AALTONEN

(lisäksi olen palauttanut vaihtosuunnat, muuten
heikkoutta kysosta)

1. a) Selosta öljypaperieristeisen tehomuuntajan vanhenemismekanismit sekä yleisimmät kunnonvalvontaan käytettävät menetelmät.
b) Selosta millaisella laitteistolla mitataan tanδ. Mitä ko. suure kuvaa ja miten sen mittausta voidaan käyttää kunnonvalvontaan?
2. Vastaa lyhyesti mihin jännitelujuutta parantaviin seikkoihin perustuu seuraavien eristys-rakennetekniikoiden käyttö?
a) tehomuuntajan öljyeristysvälin jakaminen osiin prespaanilevyillä
b) hermeettisesti suljettu koteloitu ilmaeristys
c) kondensaattorin polypropyleenieristyksen impregnoiminen mono/dibentsyyli-tolueenilla
3. Ovatko seuraavat väitteet totta vai ei? Jos ne ovat totta, niin kerro mikä selittää ilmiön. Jos ne taas eivät pidä paikkaansa, niin kerro mikä niissä on väärin.
a) SF₆-kaasulla on suurempi jännitekestoisuus kuin samanpaineisella ilmalla.
b) Suojakipinävälillä on suurempi läpilyöntijännite jyrkkyydellä 2000 kV/μs nousevalla syöksyjännitteellä kuin 1000 kV/μs nousevalla syöksyjännitteellä.
c) Epähomogeenisilla epäsymmetrisillä ilmaväleillä on aina suurempi läpilyöntijännite salamasyöksyjännitteellä kuin vaihtojännitteellä.
d) Tyhjoeristysvälin läpilyöntijännite ei riipu elektrodien materiaalista.
4. Tavallista metallirakenteista nosturia käytetään 420 kV johdon välittömässä läheisyydessä. Nosturin pään ja johdon välisen elektrodivälin muotokertoimeksi voidaan olettaa 1,4. Nosturin pään ja johdon vaihejohtimen välinen lyhin etäisyys nosturinaariasennossa on 6 m.
a) Kuinka suuri on nosturi - johto - välin 50 % läpilyöntijännite standardi kyt-kentäjänniteaallolla?
b) Kuinka suuri on ko. johdolla 1% läpilyöntitodennäköisyyttä vastaava jännite, jos kyt-kentäjännitteellä voidaan olettaa läpilyöntijännitteen hajonnan olevan 8%.
c) Johdolla esiintyvän suurimman kyt-kentäjäjännitteen maan ja vaiheen välillä oletetaan olevan luokkaa 3 p.u. (n. 1030 kV)? Onko kyseisen nosturin käyttö em. tapauksessa turvallista? Perustele.

Vihje: Pitkille ilmaväleille kyt-kentäjännitteellä pätee $U_{50\%} = k \cdot \frac{3400}{1 + \frac{s}{d}} \text{ kV}$

1. 25 mm pituisen tasoelektrodivälin kumpaankin elektrodiin (pinta-ala 10 cm^2) on kiinnitetty 10 mm paksuinen eristekerros (kummassakin elektrodissa samasta materiaalista). Eristeiden väliin jäävässä tilassa on ilmaa normaalipaineessa. Elektrodien välistä vaihtojännitettä (50 Hz) nostettaessa alkavat ilmapäälissä osittaispurkaukset jännitteen tehollisarvolla 25 kV.

a) Mikä on eristemateriaalin suhteellinen permittiviteetti? (3 p.)

b) Mikä on koko eristerakenteen kapasitanssi? (2 p.) $0,52 \text{ nF}$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$$

a) 5,21

b) 1 pF

2. Townsendin purkauksessa anodille tulevan virran on todettu noudattavan yhtälöä

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

a) Selosta fysikaaliset ilmiöt, joiden voimakkuutta yhtälössä esiintyvät kertoimet α ja γ kuvaavat. (2 p.)

b) Kuvaile koejärjestely, jolla voit saada ko. kertoimet määritettyä. (3 p.)

c) Miten saat määritettyä arvon kriittiselle kentänvoimakkuudelle, jota suuremmalla arvolla läpilyönti voi tapahtua, jos tiedät, että kertoimelle α pätee $\alpha = A p e^{-B p d / U}$. (2 p.)

$$U = \frac{B p d}{\ln\left(\frac{A p d}{1 - \gamma}\right)}$$

3. Lieriösymmetrinen ilmaeristeinen (normaalipaine) läpivienti on alun perin suunniteltu siten, että sisäsäde r on 10 mm ja ulkosäde R on 35 mm.

a) Rakennetta ei ole suunniteltu aivan optimaalisesti ja rakenteen läpilyöntijännitettä halutaankin parantaa kasvattamalla sisälieriön sädettä ulkosäteen ja ilman paineen pysyessä ennallaan. Mihin sisäsäteen arvoon asti purkausten syttymisjännite on suurempi kuin säteen arvolla 10 mm? (3 p.)

b) Millä sisäsäteen arvolla lieriö olisi optimimitoitettu jännitelujuuden suhteen. (1 p.)

c) Jos sisälieriön säde pidetään ennallaan arvossa 10 mm ja sen pinnalle lisätään 5 mm paksuinen kiinteä eriste ($\epsilon_r = 3$), niin kasvaako vai pieneneekö jännite, jolla purkaukset kaasussa syttyvät? Perustelee. (2 p.)

Huom: pisteet tulevat perusteluista, ei oikeaankaan osuneista arvauksista!

a) $\approx 16 \text{ mm}$

b) $R = 12,87 \approx 13 \text{ mm}$

c) jännitekestoisuus paranee

4. Tarkastellaan tanko-taso (tangon säde \ll tangon etäisyys tasosta) ilmapäälä (normaalipaine).

a) Kuvaile millaisia purkausilmiöitä tapahtuu tangon ollessa positiivinen tai negatiivinen (taso on vastaavasti negatiivinen tai positiivinen), jos kummassakin tapauksessa elektrodien välistä tasajännitettä aletaan hitaasti nostaa. Kummalla polariteetilla on alhaisempi läpilyöntijännite ja miksi? (4 p.)

b) Edellisen kohdan mukaiseen tanko-taso -väliin kytketään tasajännitteen sijasta 50 Hz vaihtojännite. Jännitettä nostaessa jossakin vaiheessa syttyvät ensimmäiset osittaispurkaukset. Missä vaihtojännitteen jakson kohdassa ne esiintyvät? Miksi? (2 p.) $\pi/2$

a) Kun tanko on positiivinen

b) $2\pi/3$

Huom! Tehtäväpaperin kääntöpuolella on Paschenin käyrä ilmalle.

1. a) Selosta fysikaalinen ilmiö, jonka voimakkuutta kuvaa Townsendin α -kerroin. Mistä tekijöistä Townsendin α -kerroin riippuu?
 b) Townsendin α -kerroimen määrittämiseksi tehtiin seuraava koe. Katodille synnytettiin elohopelampun avulla jatkuva $4 \cdot 10^{-12}$ A suuruinen virta. Elektrodienvälissä oli ilmaa 1,32 kPa paineessa. Anodille tuleva virta* mitattiin muutamalla elektrodivälillä siten, että sekä paine että sähkökentän voimakkuus elektrodienvälillä pidettiin vakiona. Tuloksena saatiin seuraavan taulukon mukaiset arvot. Miten voit kokeen perusteella laskea Townsendin α -kerroimen? Perustele miksi? Kuinka suuri on α ?

d, mm	1	2	3	4	5
i, A $\cdot 10^{-12}$	5,9	8,7	12,9	19,1	28,2

*Anodille tuleva virta noudattaa yhtälöä
$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

2. Vastaa lyhyesti mihin jännitelujuutta parantaviin seikkoihin perustuu seuraavien eristys-rakennetekniikoiden käyttö?
 a) tehomuuntajan öljyeristysvälin jakaminen osiin prespaanilevyillä
 b) puolijohtavien kalvojen käyttö öljypaperieristeisessä läpiviennissä
 c) kondensaattorin polypropyleenieristykseen impregnoiminen mono/dibentsyyli-tolueneilla
3. Öljypaperieristeisen kaapelin johtimen säde $r_1=20$ mm ja vaipan säde $r_2=70$ mm. Öljypaperieristeen suhteellinen permittiviteetti ϵ_r on 3.
 a) Kuinka suuri on öljypaperieristeessä esiintyvä suurin kentänvoimakkuus, kun johtimen ja maadoitetun ulkovaipan välisen jännitteen huippuarvo on 140 kV?
 b) Kun öljypaperieristeessä on 0,1 mm paksuinen litteä ilmaontelo virtajohtimen pinnalla, alkavat ontelossa osittaispurkaukset elektrodienvälisen vaihtojännitteen tehollisarvon arvolla 100 kV. Kuinka suurella jännitteellä (tehollisarvo) purkaukset olisivat alkaneet, jos vastaava ontelo olisikin ollut öljypaperieristeessä ulkovaipan sisäpinnalla?
4. a) Selosta miten jännitteen napaisuus vaikuttaa epähomogeenisen tanko-taso –ilmaeristysvälin jännitelujuuteen syöksyjännitteellä ja miksi?
 b) Selosta miten jännitteen kestoaika vaikuttaa epähomogeenisen tanko-taso –ilmaeristysvälin jännitelujuuteen ja miksi?

