

1 TRANSMISSIELIJNEN

1.1 Inleiding

De verbinding tussen een informatiebron en een ontvanger wordt gevormd door de transmissieweg. Het soort transmissieweg dat in een bepaald geval gekozen wordt is van bepaalde factoren afhankelijk. We kunnen kiezen uit:

- de draad- of kabelverbinding;
- de draadloze verbinding.

In elektrisch opzicht kunnen we de kabelverbinding in twee hoofdgroepen indelen, namelijk:

- de symmetrische kabel;
- de asymmetrische kabel.

1.1.1 De symmetrische kabel

De *symmetrische kabel* heeft als kenmerk dat beide geleiders dezelfde eigenschappen bezitten ten opzichte van aarde. Dit betekent dat beide geleiders ten opzichte van aarde dezelfde potentiaal bezitten. Zowel bron als belasting moeten hier eveneens symmetrisch zijn. We zeggen in dit geval ook wel dat bron en belasting *zwevend* zijn.

Fig. 1 geeft het principe van een symmetrische kabel.

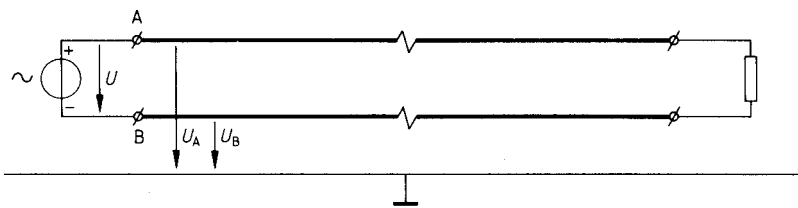


Fig. 1 Principe symmetrische kabel

1.1.2 De asymmetrische kabel

Het kenmerk van de *asymmetrische kabel* is dat één van beide geleiders met aarde is verbonden. Zie fig. 2

Dit betekent dat één van beide geleiders ten opzichte van aarde spanningsloos is. Bron en belasting zijn ook hier asymmetrisch.

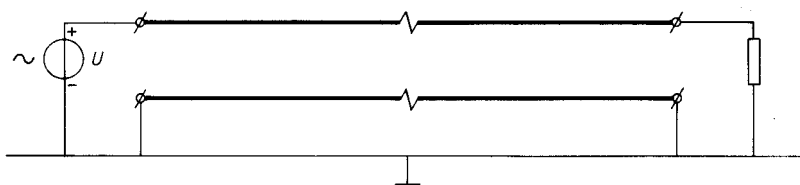


Fig. 2 Principe asymmetrische kabel

1.2 Soorten kabels

Transmissiewegen uitgevoerd met kabel kunnen bestaan uit:

- een parallel- of tweedraadsgeleiding;
- een coaxkabel;
- een glasvezelkabel.

1.2.1 Parallelgeleiding

De parallel- of tweedraadsgeleiding bestaat uit een heen- en retourleiding die zijn ondergebracht in een gemeenschappelijke afgeschermde omhulling, zie fig. 3.

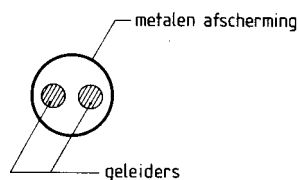


Fig. 3 Doorsnede parallellijn

Vaak worden meer adersparen tot één kabel samengesteld. Dit type kabel wordt echter steeds minder toegepast o.a. vanwege de grote mate van *overspraak tussen* de geleiders onderling.

Tot de groep van tweedraadsgeleidingen behoort ook de z.g. *lintlijn of bandkabel*, zie fig. 4. Dit type kabel werd in het verleden veel toegepast als verbinding tussen televisie- ontvangers en de bijbehorende antenne. Deze kabel is echter storingsgevoelig en heeft een beperkte levensduur. Deze uitvoering van de tweedraadsgeleiding wordt nagenoeg niet meer toegepast.

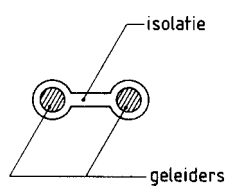


Fig. 4 Doorsnede van bandkabel

1.2.2 Coaxiale kabel

De coaxiale kabel, kortweg vaak *coaxkabel* genoemd, bestaat uit een binnengeleider, die concentrisch binnen een metalen buitenmantel is aangebracht, zie fig. 5.

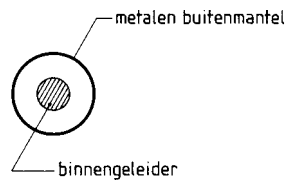


Fig. 5 Doorsnede coaxkabel

De buitenmantel doet hier dienst als tweede geleider. Deze buitenmantel wordt normaal geaard waardoor deze kabel van het asymmetrische type is. Meerdere coaxkabels kunnen worden verenigd tot een grote kabel. Een belangrijk voordeel is hier dat de geleiders onderling worden afgeschermd, waardoor een hoge mate van storingsongevoeligheid wordt bereikt.

De coaxkabel wordt thans op grote schaal toegepast. In het bijzonder denken we hierbij aan de toepassing in kabelnetten voor distributie van radio- en televisieprogramma's.

1.2.3 Glasvezelkabel

Overdracht via *glasvezelkabel* is een recente technische ontwikkeling. Uit kwartsglas worden uiterst dunne glasvezels met een hoge zuiverheidsgraad getrokken. De dikte kan enige honderdsten van een millimeter bedragen. Door deze glasvezelgeleiders wordt informatie met behulp van licht overgedragen. De voortplanting vindt plaats door voortdurende weerkaatsing van licht, zie fig. 6.

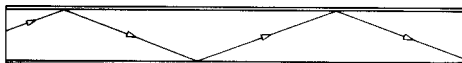


Fig. 6 Voortplantingswijze van lichtgolven door glasvezelkabel

Voor wat betreft de informatiedichtheid (aantal telefoongesprekken per aderpaar), hun relatief geringe verliezen en hun geringe afmetingen, overtreffen zij kwalitatief de coaxkabel.

1.3 Netwerken met verspreide elementen

Uit de elektriciteitsleer weten we dat een elektrische stroom zich in netwerken voortplant met een *eindige* snelheid. Bekend is dat een elektromagnetische golfbeweging zich voortplant met een snelheid van 300 000 km/s.

Bij berekeningen aan elektrische netwerken wordt hierbij alleen met de *tijd* als variabele gerekend. We kunnen hiermee volstaan zolang de *afgelegde weg* van het elektrische signaal *klein* is ten opzichte van de *golflengte* λ . Elektrisch gezien spreken we dan van *kwasi-stationair* gedrag. Is de lengte van een kabel echter in de orde grootte van de golflengte λ of groter, dan spreken we van een *lange leiding*. Bij berekeningen aan lange leidingen speelt dan naast de *tijd* ook de *plaats* op de kabel een rol. In dit geval zijn beginpunt en eindpunt van de lijn verspreid.

1.4 Elektrische opbouw transmissiekabel

Een stukje kabel kan door een vierpool worden voorgesteld die bestaat uit elektrische componenten. Fig. 7 toont het elektrische vervangschema van zo'n stukje kabel. De vierpool, die dit stukje kabel vertegenwoordigt, noemen we een *sectie*. Een dergelijke sectie bestaat uit de grootheden C' , R' en G' . Het accent -teken geeft aan dat het gaat om de grootte per *lengte-eenheid*. Een kabel bestaat uit een aaneenschakeling van dergelijke secties, waarbij de grootheden *homogeen* over de kabel zijn verdeeld.

Hierbij is:

- L' de zelfinductie in de voortplantingsrichting;
- C' de capaciteit tussen de aders;
- R' de ohmse weerstand in de voortplantingsrichting;
- G' de geleiding tussen de aders.

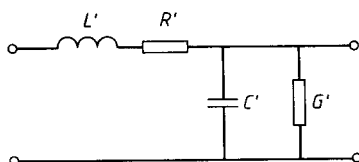


Fig. 7 Elektrisch vervangschema transmissiekabel

1.5 De voortplantingssnelheid

Een hoeveelheid *elektromagnetische energie* plant zich over een lange leiding met *eindige snelheid* (300 000 km/s) voort als het *diëlektricum* bestaat uit lucht of vacuüm. Bij toepassing van andere diëlektrica, blijkt de voortplantingssnelheid *lager* te zijn. Dit verschil in voortplantingssnelheid hangt samen met de *elektrische en magnetische eigenschappen* van de toegepaste materialen. De zelfinductie L' van de kabel *vertraagt de stroomverandering* in de geleiders. De capaciteit C' is er de oorzaak van dat pas na enige tijd elk punt van de kabel op spanning is. De zelfinductie L' en de capaciteit C' zorgen beiden dus voor een *vertraging* van het betreffende signaal. Aangetoond kan worden dat we voor de voortplantingssnelheid kunnen schrijven:

$$v = 1/\sqrt{L'.C'}$$

Waarin:

- v = de voortplantingssnelheid in m/s;
- L' = de zelfinductie in H/m;
- C' = de capaciteit in F/m.

De grootte van L' en C' zijn afhankelijk van de *afmetingen* van de kabel en het toegepaste *diëlektricum*.

1.6 De verkortingsfactor

Bij het berekenen van de golflengte van een elektromagnetische golfbeweging gaan we normaal uit van de lichtsnelheid. We weten dat de golflengte van een golfbeweging gelijk is aan de weg die deze golf aflegt binnen de periodetijd.

De golflengte volgt dan uit de formule

$$\lambda = c / f$$

Waarin:

- λ = de golflengte in meter;
- c = de lichtsnelheid (3×10^8 m/s);
- f = de frequentie in Hz.

Afhankelijk van de grootte van L' en C' van een bepaalde kabel, is de *werkelijke* voortplantingssnelheid *lager* dan de lichtsnelheid. Bij *constante frequentie en lagere voortplantingssnelheid* van een golfbeweging is de *golflengte* dus eveneens *kleiner*. De *verhouding* tussen de werkelijke voortplantingssnelheid en de lichtsnelheid noemen we de *verkortingsfactor*.

De verkortingsfactor wordt ook wel *relatieve voortplantingssnelheid* genoemd.

1.7 De karakteristieke impedantie

1.7.1 Definitie

De karakteristieke impedantie Z_k is de ingangsimpedantie van een oneindig lange lijn.

Er treden immers geen reflecties op daar het oneindig lang duurt eer een aangelegde golf het einde van de lijn bereikt.

Als men een lijn afsluit met een impedantie, dan zal bij een bepaalde keuze van deze afsluitimpedantie de lijn reflectievrij zijn. In dit geval is **de lijn aangepast**. De impedantie die we hebben aangesloten bij het reflectievrije gedrag, is de karakteristieke impedantie van de lijn zelf.

Voor de berekening van de karakteristieke impedantie Z_k gebruiken we het elektrische vervangschema. In fig. 8 is een stuk kabel, van een oneindig lange lijn, schematisch weergegeven.

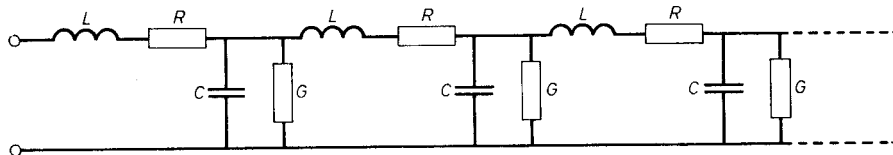


Fig.8 Vervangschema van een oneindig lange lijn

Het signaal dat aangelegd wordt, ziet hierbij de karakteristieke impedantie als belasting. Als we voor deze lijn een stukje kabel met lengte Δx plaatsen, is de lijn nog steeds oneindig lang. Het lijnstukje wordt dan afgesloten met de oneindig lange lijn, dus met Z_k (zie fig. 9)

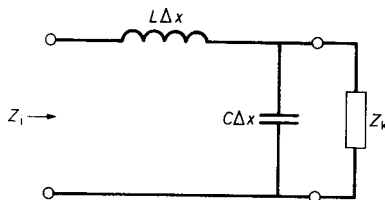


Fig 9 vervangschema van een stukje verliesvrije lijn (R en G te verwaarlozen)

De ingangsimpedantie van dit lijnstukje is echter ook weer gelijk aan Z_k , zodat nu geldt:

$$Z_i = Z_k = j\omega L\Delta x + \frac{\frac{1}{j\omega C\Delta x} Z_k}{\frac{1}{j\omega C\Delta x} + Z_k}$$

Dit kunnen we uitwerken tot:

$$\frac{Z_k}{j\omega C\Delta x} + Z_k^2 = \frac{j\omega L\Delta x}{j\omega C\Delta x} + j\omega L\Delta x Z_k + \frac{Z_k}{j\omega C\Delta x}$$

Als we de lengte Δx naar nul laten naderen, dan gaat ook de term $j\omega L\Delta x Z_k$ naar nul. Zodat:

$$Z_k^2 = \frac{L}{C}$$

of:

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

De karakteristieke impedantie van de niet-verliesvrije lijn (de weerstand R en de geleiding G niet verwaarloosbaar) blijkt gelijk te zijn aan:

$$Z_k = \sqrt{\frac{j\omega L + R}{j\omega C + G}}$$

Een lijn met een eindige lengte die afgesloten wordt met een impedantie Z_k gedraagt zich als een oneindig lange lijn. Alle energie van de lopende golf wordt opgenomen door de belasting.

1.8 Reflectie

1.8.1 Inleiding

We spreken van *reflectie* indien er, zoals opgemerkt, op een kabel energie *terugkeert* van de belasting naar de generator. De oorzaak van deze reflectie is het feit dat een kabel wordt belast met een belasting Z_l die *ongelijk* is aan de karakteristieke weerstand of golfweerstand Z_k van de kabel.

Bij reflectie kunnen we de volgende gevallen onderscheiden:

- de kabel is aan het einde *onbelast of open* ($Z_l = \infty$)
- de kabel wordt aan het einde *kortgesloten* ($Z_l = 0$);
- de kabel wordt aan het einde belast met een willekeurige impedantie ($Z_l \neq Z_k$).

Bij reflectie tegen een *open of kortgesloten* einde wordt er géén energie afgestaan aan de belasting. Er treedt dan *volledige reflectie op*.

Bij belasting met een willekeurige weerstand wordt de energie *gedeeltelijk* naar de belasting overgedragen en *gedeeltelijk* gereflecteerd. In het geval dat $Z_l = Z_k$ vindt volledige energieoverdracht plaats.

1.8.1.1 Spanningsreflectie tegen open einde

Bij reflectie van een heengaande spanning U^+ tegen het open einde van een kabel is de resulterende spanning in het belastingspunt niet nul. Bij een verliesvrije kabel bedraagt de resulterende spanning:

$$U^+ + U^- = 2 \cdot U^+$$

Fig.10 toont de reflectie van een *gelijkspanningsgolf* tegen een open einde.



Fig.10 Reflectie van gelijkspanningsgolf in open einde

Stromen gaan gepaard met een *magnetisch veld*. Als de resulterende stroom naar nul gaat, gebeurt hetzelfde met het magnetisch veld.

Een kabel heeft, zoals besproken, een zelfinductie L' . Door de stroomverandering ontstaat er een *inductiespanning*. Zoals bekend werkt een inductiespanning de oorzaak van zijn ontstaan tegen. Bij een *stroomafname* zal de zelfinductiespanning in dezelfde richting werken als de heengaande spanning U^+ en is dus hiermee in fase. Door deze inductiespanning wordt de spanning in het belastingspunt verhoogd. Deze spanning keert vervolgens terug naar de bron en we noemen dit de *gereflecteerde spanning* U^-

Bij reflectie tegen een open kabeleinde wordt de spanning in fase gereflecteerd.

Op overeenkomstige wijze kunnen we beredeneren dat de stroom *in tegenfase* wordt gereflecteerd.

1.8.1.2 Spanningsreflectie tegen kortgesloten einde

In een *kortsluiting* kan geen spanning bestaan. De resultante van de *heengaande* spanning U^+ en de *gereflecteerde spanning* U^- is nul. In fig.11 is dit voorgesteld door een gelijkspanningsgolf die in een kortgesloten einde wordt gereflecteerd. Door reflectie keert nu een spanning U^- in tegenfase met U^+ terug naar het begin van de kabel.

Spanningsreflectie tegen een kortgesloten kabeleinde vindt plaats in tegenfase.

Op overeenkomstige wijze kan beredeneerd worden dat *stroomreflectie* in een kortsluitpunt *infase* plaatsvindt.



Fig.11 Reflectie van gelijkspanningsgolf bij kortgesloten kabel

1.8.2 Staande golven

Het staande-golfpatroon ontstaat door interferentie van de heengaande en de teruggaande golven.

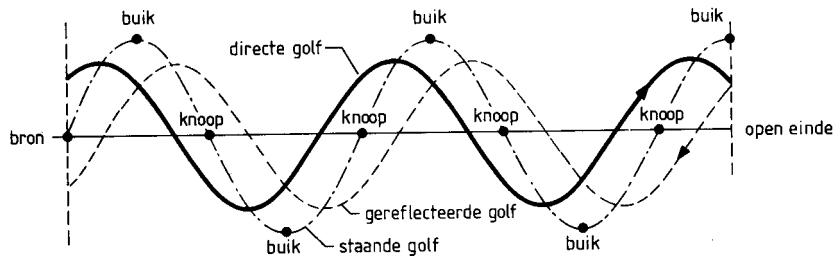


Fig.12 Ontstaan van een staande spanning golf

Meten we langs een kabel waarop totale reflectie optreedt de spanning als functie van de plaats dan ontstaat voor een open- *respectievelijk* kortgesloten kabel een verloop zoals in fig.13 is weergegeven.

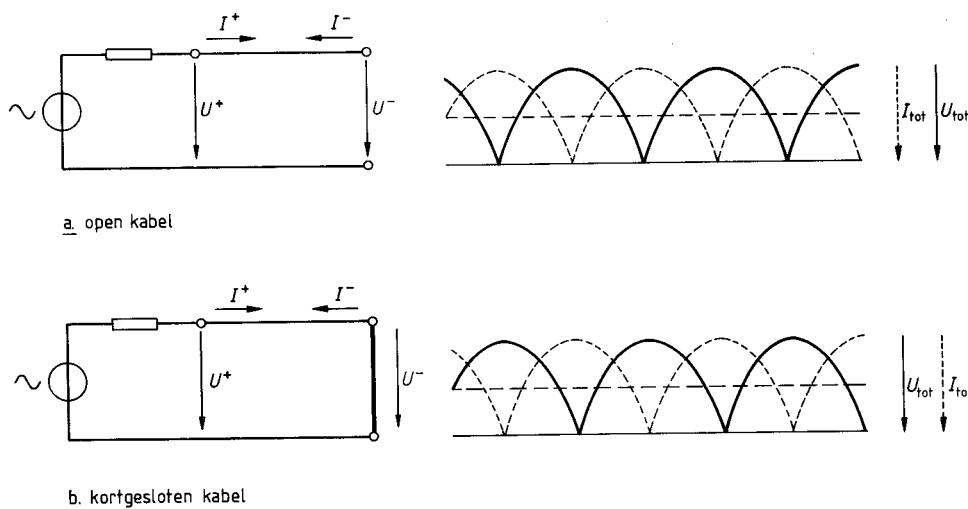


Fig.13 $U=f(l)$ bij totale reflectie

1.8.3 De reflectiecoëfficiënt r

Met de reflectiecoëfficiënt geven we de verhouding tussen de heengaande en de teruggaande golf aan. Omdat hierbij faseverschuiving kan ontstaan, zal de reflectiecoëfficiënt een complex getal zijn waarvan de absolute waarde ligt tussen 0 (geen reflectie) en 1 (totale reflectie).

Men kan aantonen dat:

$$r = \frac{Z_1 - Z_k}{Z_1 + Z_k}$$

1.8.4 De staande-golfverhouding

De verhouding tussen de optredende maximums en minimums noemen we de staande-golfverhouding (standing wave ratio of SWR) en is afhankelijk van de reflectie. De VSWR (voltage standing wave ratio) kan dus als maat voor de reflectie gebruikt worden.

$$VSWR = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

1.9 Kabeldemping

1.9.1 Inleiding

Een transmissiekabel transporteert een hoeveelheid elektrisch vermogen. In kabels treedt hierbij vermogensverlies op. We spreken dan van *demping*.

De grootte van de demping is frequentieafhankelijk. Bij misaanpassing neemt het verlies bovendien toe.

Demping ontstaat voornamelijk als gevolg van:

- warmteontwikkeling (ohms verlies);
- straling.

De demping wordt vooral veroorzaakt door warmteontwikkeling in de weerstand van de geleiders. Tengevolge van het skin-effect is dit verlies frequentieafhankelijk. Daarnaast treedt, zij het in geringe mate, uitstraling op van elektromagnetische energie. We noemen dit het *stralingsverlies*.

Met betrekking tot de demping in een kabel zijn een aantal begrippen gedefinieerd, te weten:

- de karakteristieke demping;
- de reflectiedemping.

1.9.2 Karakteristieke demping

Onder de *karakteristieke demping* van een kabel verstaan we de demping die optreedt bij reflectievrije afsluiting.

Wordt er aan de kabel een vermogen P_1 toegevoerd dan wordt er tengevolge van demping aan de belasting een kleiner vermogen P_2 geleverd. Het *verschil tussen P_1 en P_2* is het *vermogensverlies*.

Zijn beide vermogens P_1 en P_2 bekend, dan volgt de karakteristieke demping uit volgende formule:

$$D = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{dB})$$

De karakteristieke demping wordt vaak opgegeven in dB/100 m bij *reflectievrije* afsluiting. Bij onjuiste afsluiting nemen de verliezen ten gevolge van vermogensreflectie in de kabel toe.

De grootte van de demping die in een kabeltraject optreedt hangt dus af van:

- de karakteristieke demping bij een bepaalde frequentie;
- de kabellengte.

1.9.3 Reflectiedemping

Onder de reflectiedemping van een kabel verstaan we de verhouding tussen het aan de kabel toegevoegde vermogen P_+ bij reflectievrije afsluiting en het gereflecteerde vermogen P_- bij misaanpassing.

De reflectiedemping kunnen we berekenen met de formule:

$$Dr = 10 \log \frac{P_+}{P_-} \quad (\text{dB})$$

De reflectiedemping wordt ook wel echodemping of *return-loss* genoemd.

1.10 Impedantie bepaling

1.10.1 Bepalen van de impedantie op een willekeurige plaats

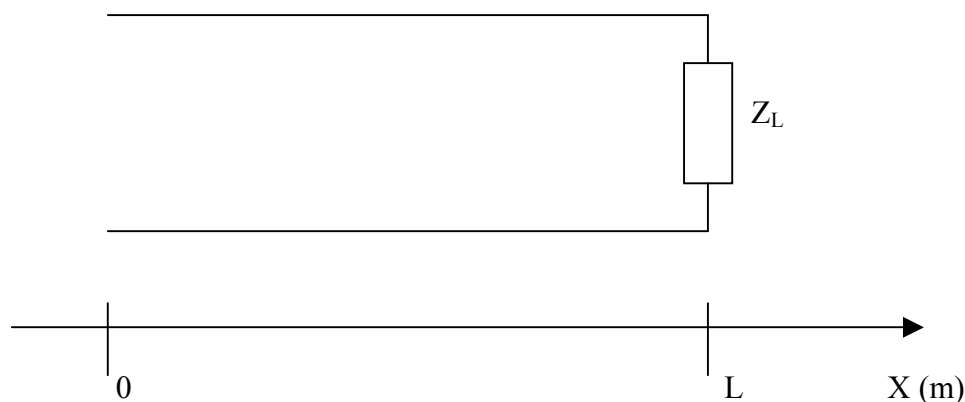


Fig. 14 bepalen van de impedantie op plaats x

Men kan aantonen dat de lokale impedantie op plaats x , kan gevonden worden door:

$$Z(x) = Z_k \frac{Z_L + jtgk(L-x)}{Z_k + jZ_Ltgk(L-x)}$$

hierin is k het golfgetal en is gelijk aan $2\pi/\lambda$

Voor praktische en grafische berekeningen zal men impedantie $Z(x)$ normeren, de genormeerde impedantie is dan:

$$Z'(x) = \frac{Z(x)}{Z_k}$$

$$Z'(x) = \frac{Z' L + j \cdot \operatorname{tg} k(L-x)}{1 + j \cdot Z' L \cdot \operatorname{tg} k(L-x)}$$

1.10.2 Bepalen van de ingangsimpedantie

Stellen we in vorige formule $x=0$, dan vinden we de **genormeerde ingangsimpedantie** :

$$Z'_{in} = \frac{Z' L + j \cdot \operatorname{tg} k(L)}{1 + j \cdot Z' L \cdot \operatorname{tg} k(L)}$$

We bekijken nu enkele speciale gevallen.

1.10.2.1 Impedantie van een korte lijn ($L \ll \lambda$)

Nu worden de term $\operatorname{tg}(2\pi L/\lambda)$ klein, zodat $Z_{in} = ZL$. Dit hebben we vroeger behandeld in de klassieke netwerktheorie.

1.10.2.2 Impedantie bij een aangepaste lijn $ZL = Z_k$

In dit geval is $Z_{in} = Z_k$ (Dit wisten we al vanwege de definitie).

1.10.2.3 Ingangsimpedantie van een open lijn

De uitdrukking herleidt zich dan naar:

$$Z'_{in} = -j \cotg(kL)$$

We kunnen het verloop en de soort impedantie als functie van l op een open kabel uitzetten. Hierbij is l de afstand tot het open einde.

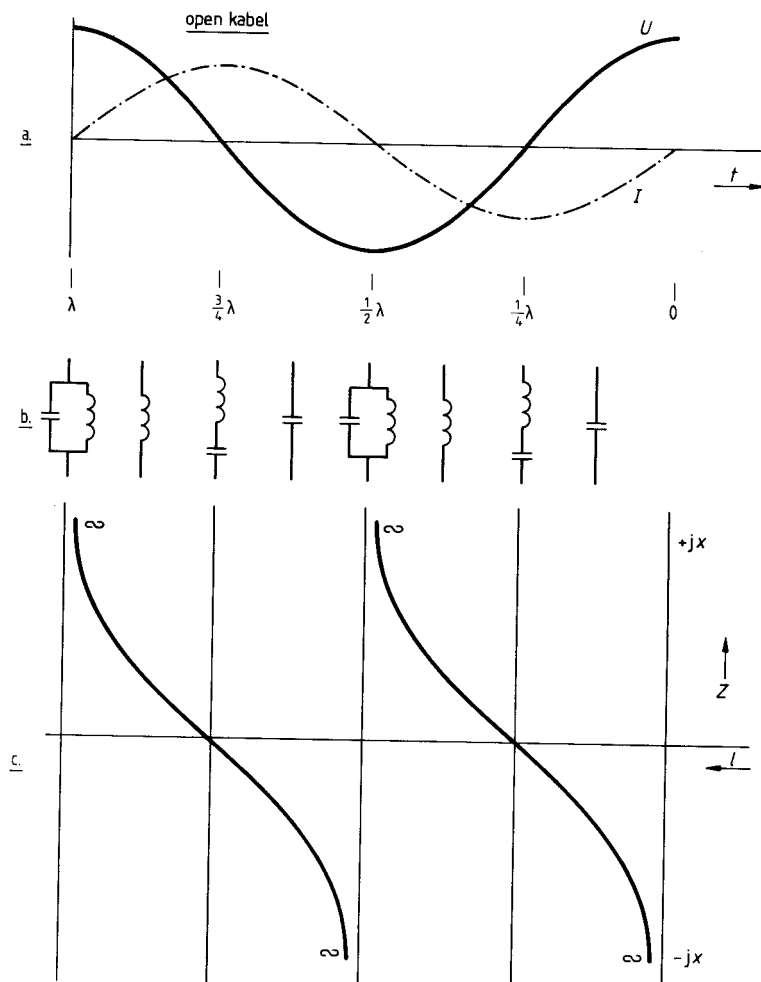


Fig. 15 Impedantieverloop op open lijn

1.10.2.4 Ingangsimpedantie van een kortgesloten lijn

De uitdrukking herleidt zich dan naar:

$$Z'_{in} = j \tg(kL)$$

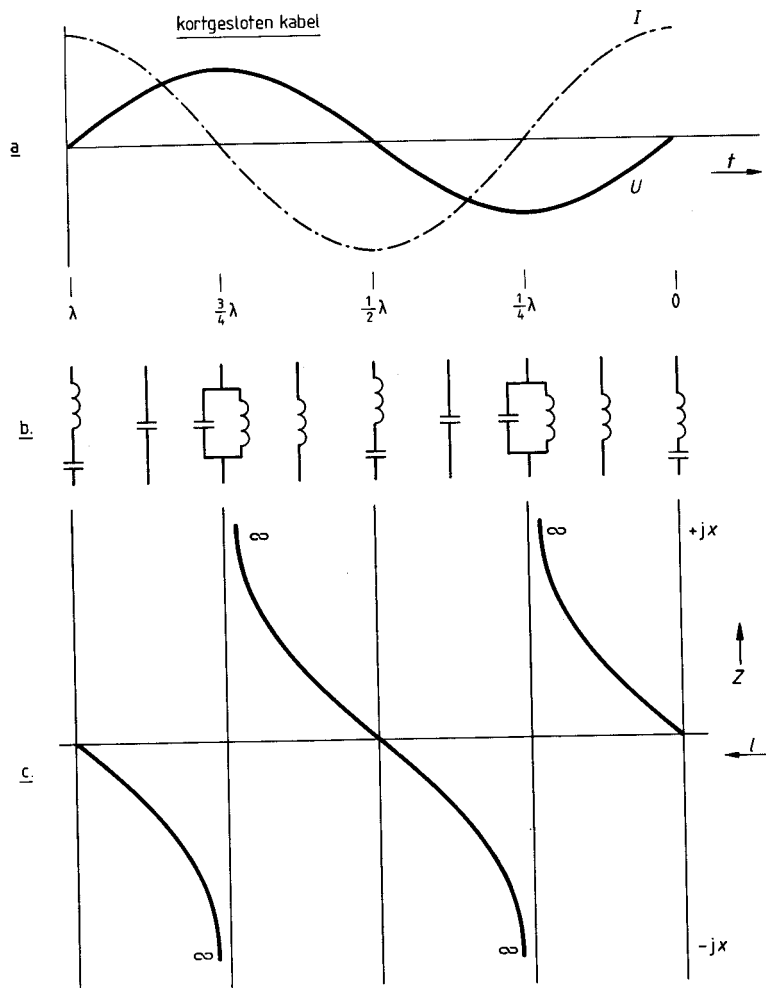


Fig 16. Impedantieverloop op kortgesloten lijn

1.10.2.5 Ingangsimpedantie van een $\lambda/2$ lijn

In dit geval heeft men dat $Z_{in} = Z_L$ het is alsof de lijn geen effect heeft op de configuratie.

1.10.2.6 Ingangsimpedantie van een $\lambda/4$ lijn

Men heeft nu dat:

$$Z_{in} = \frac{Z_k^2}{Z_L}$$

Dit betekent dat Z_L getransformeerd wordt naar $Z_{in} = \frac{Z_k^2}{Z_L}$ aan de ingang.

Men noemt dit een **kwartgolflengtetransformator**. Deze transformator wordt aangewend bij de realisatie van passieve microgolf-filters op microstripdragers.