

Adaptation des impedances application aux coupleurs d'antennes

Impedantie-aanpassing toegepast op antennekoppelaars

(partie/deel 2)

Par/door ON5WF (MNS) - Vertaald door ON5UK

3.2. Admittances

3.2.1 Définition

L'admittance est définie comme l'inverse de l'impédance. Pour une impédance $Z = R + jX$, on définit l'admittance Y par

$$\bar{Y} = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2} = G + jS \quad (7)$$

A partir de la relation (7), on définit:

- la conductance $G = \frac{R}{R^2 + X^2}$ (8)

- la susceptance $S = -\frac{X}{R^2 + X^2}$ (9)

On remarquera qu'en général, la conductance n'est pas l'inverse de la résistance et que la susceptance n'est pas l'inverse de la réactance.

Cependant, pour une résistance pure R , on a bien: $G = \frac{1}{R}$

et pour une réactance pure X : $S = \frac{-1}{X}$

(attention au signe -!). Donc,

- pour une inductance, X est >0 et S est <0 ;
- pour une capacité, X est <0 et S est >0 .

L'admittance s'exprime en **siemens**.

Tout comme pour les impédances, on peut représenter une admittance par un point dans le plan complexe; l'axe vertical peut alors être gradué en valeurs de susceptance (siemens) et l'axe horizontal en valeurs de conductance (siemens également). Comme l'admittance est l'inverse d'une impédance, on peut aussi considérer qu'elle est représentée par le point représentatif de l'impédance correspondante.

Exemple 4

Calculer les admittances des circuits des exemples 1 et 2.

Solution

1° Pour le circuit de l'exemple 1: $\bar{Z} = (100 + j 116,24) \Omega$, donc

$$\bar{Y} = \frac{1}{Z} = \frac{1}{100 + j116,24} = \frac{100 - j116,24}{100^2 + 116,24^2} = (4,253 - j4,944) \text{ mS}$$

1° Pour le circuit de l'exemple 2: $\bar{Z} = (100 - j 143,38) \Omega$, donc

$$\bar{Y} = \frac{1}{Z} = \frac{1}{100 - j143,38} = \frac{100 + j143,38}{100^2 + 143,38^2} = (3,272 + j4,692) \text{ mS}$$

On peut vérifier le résultat au moyen des relations (8) et (9).

3.2. Admittanties

3.2.1 Definitie

De admittantie heeft de omgekeerde waarde van de impedantie. Voor een impedantie $Z = R + jX$, is de admittantie Y

$$\bar{Y} = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2} = G + jS \quad (7)$$

Uit vergelijking (7) volgt:

- de conductantie (of geleiding) $G = \frac{R}{R^2 + X^2}$ (8)

- de susceptantie $S = -\frac{X}{R^2 + X^2}$ (9)

Merk op dat in het algemeen de conductantie niet gelijk is aan de inverse waarde van de weerstand en dat de susceptantie niet gelijk is aan de inverse waarde van de reactantie.

Toch is voor een zuivere weerstand R , $G = \frac{1}{R}$

en voor een zuivere reactantie X , $S = \frac{-1}{X}$

(let op het - teken!). We kunnen dus stellen dat:

- voor een spoel: als $X > 0$ dan is $S < 0$;
- voor een capaciteit: als $X < 0$ dan is $S > 0$.

De admittantie wordt uitgedrukt in **siemens**.

Zoals voor een impedantie kunnen we de admittantie voorstellen door een punt in het vlak van de complexe getallen. Op de verticale as staat de waarde van de susceptantie (in siemens) en op de horizontale de waarde van de conductantie (eveneens siemens). Omdat de admittantie de inverse is van de reactantie kan men ook stellen dat ze eveneens voorgesteld wordt door het punt van de overeenkomstige impedantie.

Voorbeeld 4

Bereken de admittanties van de schakelingen van de voorbeelden 1 en 2.

Oplossing

1° Voor de schakeling van voorbeeld 1: $\bar{Z} = (100 + j 116,24) \Omega$, dus

$$\bar{Y} = \frac{1}{Z} = \frac{1}{100 + j116,24} = \frac{100 - j116,24}{100^2 + 116,24^2} = (4,253 - j4,944) \text{ mS}$$

1° voor de schakeling van voorbeeld 2: $\bar{Z} = (100 - j 143,38) \Omega$, dus

$$\bar{Y} = \frac{1}{Z} = \frac{1}{100 - j143,38} = \frac{100 + j143,38}{100^2 + 143,38^2} = (3,272 + j4,692) \text{ mS}$$

Het resultaat kan gecontroleerd worden aan de hand van de formules (8) en (9).

3.2.2 Transformations série-parallèle

Nous avons vu qu'une impédance peut être représentée comme une résistance R_s en série avec une réactance X_s . Dans certains cas, l'impédance se présente sous la forme d'une résistance R_p en parallèle avec une réactance X_p (les indices s et p ont été mis pour bien distinguer les deux cas) (**figure 6**). Il est intéressant de pouvoir passer de la forme série à la forme parallèle et vice versa.

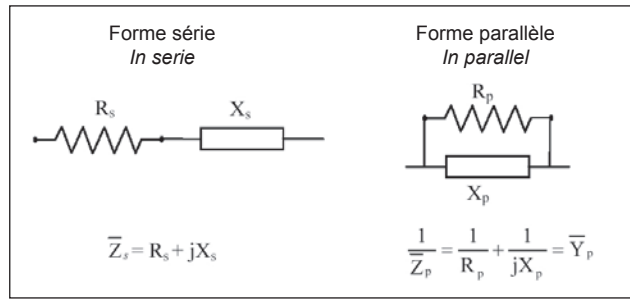


Figure 6: De voorstellingen van een impedantie in serie en parallel.

Figure 6: Formes série et parallèle d'une impédance.

Les deux impédances étant supposées égales, nous pouvons écrire:

$$\bar{Z}_s = R_s + jX_s = \bar{Z}_p = \frac{R_p * jX_p}{R_p + jX_p} = \frac{R_p * X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} + j \frac{R_p^2 * X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad (10)$$

On en déduit les relations permettant de passer de la forme parallèle à la forme série:

$$R_s = \frac{R_p * X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} \text{ et } X_s = \frac{R_p^2 * X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad (11)$$

On peut aussi égaliser les admittances correspondantes:

$$\bar{Y}_s = \frac{1}{\bar{Z}_s} = \frac{1}{R_s + jX_s} = \frac{R_s - jX_s}{R_s^2 + X_s^2} = \bar{Y}_p = \frac{1}{\bar{Z}_p} = \frac{1}{R_p} + j \frac{-1}{X_p} \quad (12)$$

D'où les relations inverses, pour passer de la forme série à la forme parallèle:

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} \text{ et } X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} \quad (13)$$

Exemple 5

Calculer les formes parallèles équivalentes aux circuits des exemples 1 et 2.

Solution

1° Une résistance de 100 Ω en série avec une inductance de 5 μH. Dans ce cas, les relations (13) nous donnent: $R_p = 235,12 \text{ } \Omega$ et $X_p = 202,27 \text{ } \Omega$; soit une résistance de 235,12 Ω en parallèle avec une inductance de 8,70 μH (à la fréquence de 3,7 MHz).

2° Une résistance de 100 Ω en série avec un condensateur de 300 pF. Les relations (13) nous donnent: $R_p = 305,58 \text{ } \Omega$ et $X_p = -213,13 \text{ } \Omega$; soit une résistance de 305,58 Ω en parallèle avec un condensateur de 201,83 pF (à la fréquence de 3,7 MHz).

3.2.3 Admittances en parallèle

Comme on l'a vu précédemment, pour deux impédances \bar{Z}_1 et \bar{Z}_2 en parallèle, on a: $\frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{\bar{Z}_1} + \frac{1}{\bar{Z}_2}$. Donc, en terme d'admittances:

$$\bar{Y} = \bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 = (G_1 + jS_1) + (G_2 + jS_2) = (G_1 + G_2) + j(S_1 + S_2) = G + jS \quad (14)$$

Lors de la mise en parallèle de deux impédances, les conductances et les susceptances s'ajoutent: $G = G_1 + G_2$ et $S = S_1 + S_2$.

En particulier, si \bar{Z}_2 est une résistance pure (dans ce cas,

$$\frac{1}{\bar{Z}_2} = \frac{1}{R_2} = G_2 = \bar{Y}_2),$$

seule la conductance est modifiée, alors que pour l'impédance correspondante, et la résistance et la réactance sont modifiées. De même, dans le cas d'une réactance pure en parallèle sur \bar{Z}_1 (dans ce cas,

$$\frac{1}{\bar{Z}_2} = \frac{1}{jX_2} = jS_2 = \bar{Y}_2),$$

seule la susceptance est modifiée (pour l'impédance correspondante, la résistance et la réactance sont modifiées).

3.2.2 Omzettingen serie-paralleel

We hebben gezien dat een impedantie voorgesteld kan worden door een weerstand R_s in serie met een reactantie X_s . Maar soms doet een impedantie zich voor als een weerstand R_p parallel met een reactantie X_p . Zie **figuur 6** (de aanduidingen s en p zijn aangebracht om de twee gevallen duidelijk te onderscheiden). Het is nuttig over te kunnen gaan van de ene naar de andere vorm.

Daar het twee voorstellingen van

dezelfde impedantie zijn, kunnen we schrijven dat:

$$\bar{Z}_s = R_s + jX_s = \bar{Z}_p = \frac{R_p * jX_p}{R_p + jX_p} = \frac{R_p * X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} + j \frac{R_p^2 * X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad (10)$$

Daaruit volgen de formules voor de omzetting van parallel naar serie:

$$R_s = \frac{R_p * X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} \text{ et } X_s = \frac{R_p^2 * X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad (11)$$

Ook de admittanties zijn gelijk:

$$\bar{Y}_s = \frac{1}{\bar{Z}_s} = \frac{1}{R_s + jX_s} = \frac{R_s - jX_s}{R_s^2 + X_s^2} = \bar{Y}_p = \frac{1}{\bar{Z}_p} = \frac{1}{R_p} + j \frac{-1}{X_p} \quad (12)$$

Waaruit de formules voor de omzetting van serie naar parallel:

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} \text{ et } X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} \quad (13)$$

Voorbeeld 5

Zet de schakelingen van de voorbeelden 1 en 2 om in de overeenkomstige parallelschakelingen..

oplossing

1° een weerstand van 100 Ω in serie met een spoel van 5 μH. Met formule (13) vinden we:

$R_p = 235,12 \text{ } \Omega$ en $X_p = 202,27 \text{ } \Omega$; of een weerstand van 235,12 Ω parallel met een spoel van 8,70 μH (op 3,7 MHz).

2° een weerstand van 100 Ω in serie met een condensator van 300 pF. Formule (13) geeft:

$R_p = 305,58 \text{ } \Omega$ en $X_p = -213,13 \text{ } \Omega$; of een weerstand van 305,58 Ω parallel met een condensator van 201,83 pF (op 3,7 MHz).

3.2.3 Admittanties in parallelle

De formule voor de berekening van twee impedanties \bar{Z}_1 et \bar{Z}_2 in parallel is: $\frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{\bar{Z}_1} + \frac{1}{\bar{Z}_2}$. Of uitgedrukt met admittanties:

$$\bar{Y} = \bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 = (G_1 + jS_1) + (G_2 + jS_2) = (G_1 + G_2) + j(S_1 + S_2) = G + jS \quad (14)$$

Als men twee impedanties parallel schakelt tellen de conductanties en de susceptanties zich bij elkaar op: $G = G_1 + G_2$ et $S = S_1 + S_2$.

Als \bar{Z}_2 een zuivere weerstand is (dan is $\frac{1}{\bar{Z}_2} = \frac{1}{R_2} = G_2 = \bar{Y}_2$),

verandert alleen de conductantie terwijl van de overeenstemmende impedantie zowel de weerstand als de reactantie wijzigen. In het geval van een zuivere reactantie parallel met \bar{Z}_1 (dan is $\frac{1}{\bar{Z}_2} = \frac{1}{jX_2} = jS_2 = \bar{Y}_2$),

wijzigt enkel de susceptantie (van de overeenkomstige impedantie veranderen zowel de weerstand als de reactantie).

Les cercles tels que celui représenté à la **figure 5** sont donc des lieux à conductance constante, la valeur de la conductance étant donnée par l'inverse de la valeur de la résistance correspondant au point d'intersection du cercle avec l'axe des R.

Dans le cas d'une adaptation vers une valeur finale de 50Ω , un cercle particulièrement intéressant est le cercle correspondant à une conductance constante de $0,02$ siemens ($1/50 \Omega$).

La **figure 7** résume les différents chemins sur lesquels se déplace le point représentatif d'une impédance lorsque l'on place une réactance en série ou en parallèle avec cette impédance (voir la **figure 8** pour les schémas).

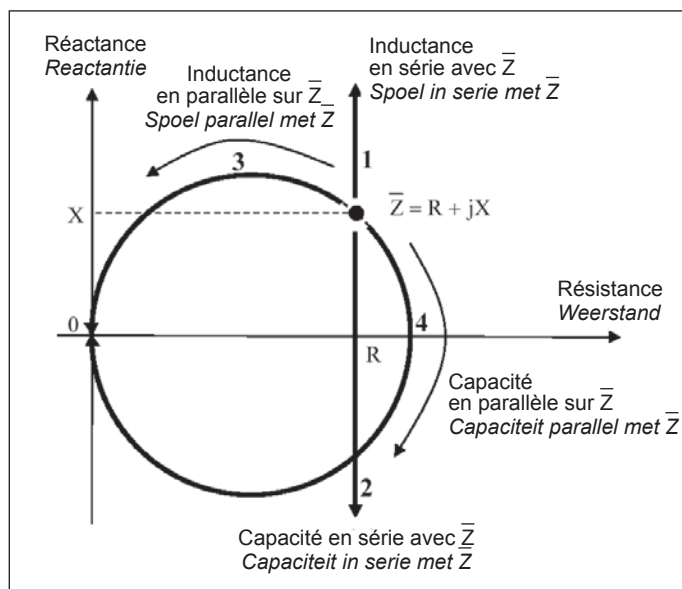


Figure 7: influence sur une impédance d'une réactance placée en série (chemins 1 et 2) ou en parallèle (chemins 3 et 4) avec cette impédance (les schémas correspondants sont donnés à la figure 8).

Figuur 7: invloed op de impedantie van een reactantie in serie (paden 1 en 2) of parallel (paden 3 en 4) met deze impedantie (zie de overeenkomstige schema's in figuur 8).

- Une inductance placée en série avec $\bar{Z} = R + jX$ (chemin N° 1) déplace vers le haut (c'est-à-dire, dans le sens des réactances croissantes) le point représentatif de l'impédance sur une parallèle à l'axe des réactances passant par R. Le déplacement est d'autant plus grand que l'inductance est grande ($X = \omega L$).
- Une capacité placée en série avec $\bar{Z} = R + jX$ (chemin N° 2) déplace vers le bas (c'est-à-dire, dans le sens des réactances décroissantes au sens mathématique du terme) le point représentatif de l'impédance sur une parallèle à l'axe des réactances passant par R. Le déplacement est d'autant plus grand que la capacité est petite ($X = -1/\omega C$).
- Une inductance placée en parallèle sur $\bar{Z} = R + jX$ (chemin N° 3) déplace dans le sens anti horlogique, le point représentatif de l'impédance sur le cercle passant par ce point. Le déplacement est d'autant plus grand que l'inductance est petite.
- Une capacité placée en parallèle sur $\bar{Z} = R + jX$ (chemin N° 4) déplace dans le sens horlogique, le point représentatif de l'impédance sur le cercle passant par ce point. Le déplacement est d'autant plus grand que la capacité est grande.

Le long des chemins 1 et 2, la résistance R est constante (mais pas la conductance); le long des chemins 3 et 4, la conductance G est constante (mais pas la résistance).

Dans la pratique, on utilise plutôt une représentation graphique polaire des impédances et des admittances mieux connue sous le nom d'**abaque de Smith**. Dans cette représentation, les chemins 1 et 2 deviennent aussi des cercles. Mais dans un premier abord, l'abaque de Smith est plus complexe que la représentation cartésienne, c'est pourquoi nous ne l'utilisons pas ici.

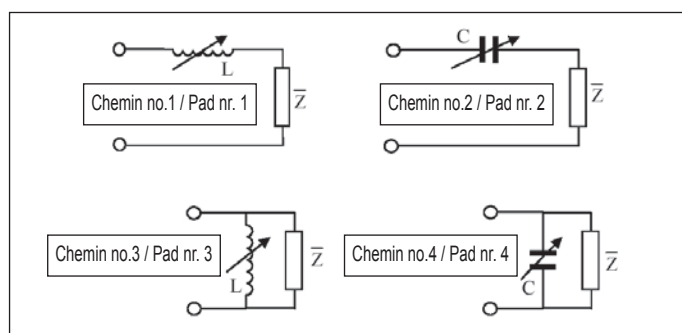


Figure 8: suivant le chemin que l'on veut suivre dans le plan complexe, la réactance doit être mise en série ou en parallèle avec l'impédance \bar{Z} .

Figuur 8: de voorstelling van de paden in et complexe vlak stemt overeen met een spoel of een capaciteit in serie of parallel met de impedantie \bar{Z} .

Op de cirkels in **figure 5** liggen alle impedanties met gelijke conductantie. De waarde van de conductantie is de inverse van de overeenkomstige weerstandswaarde die we terug vinden in het snijpunt van de cirkel met de R-as.

Bijzonder interessant is de cirkel waarop de conductanties van $0,02$ siemens ($1/50 \Omega$) liggen en waarvan we gebruik maken bij aanpassing naar 50Ω .

In **figure 7** zijn de banen getekend op dewelke het punt dat een impedantie voorstelt beweegt als we een reactantie in serie of parallel schakelen (zie **figure 8** voor de schema's).

- Een spoel in serie met $\bar{Z} = R + jX$ (pad nr. 1) verschuift het punt dat de impedantie voorstelt naar boven (in de zin van de toenemende reactanties) op een verticale die de horizontale as snijdt in R.

De verschuiving neemt toe bij grotere waarden van de inductantie ($X = \omega L$).

- Een capaciteit in serie met $\bar{Z} = R + jX$ (pad nr. 2) verschuift het punt dat de impedantie voorstelt naar beneden (in de zin van de afnemende reactanties) op een verticale die de horizontale as snijdt in R. De verschuiving neemt toe bij kleinere waarden van de capaciteit ($X = -1/\omega C$).

- Een spoel parallel met $\bar{Z} = R + jX$ (pad nr. 3) verschuift het punt dat de impedantie voorstelt in tegenwijzerzin op een cirkel die door dat punt gaat. De verschuiving neemt toe met afnemende waarden van de inductantie van de spoel.

- Een capaciteit in parallel met $\bar{Z} = R + jX$ (pad nr. 4) verschuift het punt dat de impedantie voorstelt in wijzerzin op een cirkel die door dat punt gaat. De verschuiving neemt tot bij een grotere capaciteit.

Langs de paden 1 en 2 is R een constante (maar dit is niet het geval voor de conductantie); langs de paden 3 en 4 is G een constante (maar niet de weerstand).

Meestal gebruikt men de polaire voorstelling van impedanties en admittanties onder de vorm van het **Smith diagram**.

In die voorstelling zijn de paden 1 en 2 ook cirkels.

Omdat voor een eerste benadering het Smith diagram ingewikkelder is dan de cartesische voorstelling zullen we er hier geen gebruik van maken.

On constate donc qu'il est en principe toujours possible de transformer une impédance donnée en une autre impédance, en plaçant des réactances en série et/ou parallèle avec cette impédance.

We stellen vast dat het altijd mogelijk is een impedantie om te zetten naar een andere door een reactantie in serie of parallel te plaatsen.

4. Condition d'adaptation des impédances

Dans la première partie de cet article, nous avons introduit le problème de l'adaptation des impédances et rappelé les notions essentielles sur les impédances et les admittances. Ce faisant, nous avons vu qu'en plaçant une réactance en série ou en parallèle avec une impédance, on pouvait modifier les parties résistives et réactives de cette impédance; ces transformations étant matérialisées dans le plan complexe par des segments de droite ou des arcs de cercle.

Dans la 2ème partie de cet article, nous étudierons plus en détail le problème de l'adaptation des impédances.

4.1 Rappel du problème

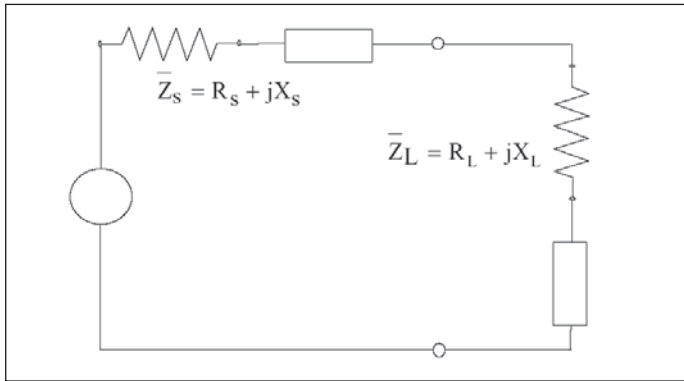


Figure 9: générateur de tension sinusoïdale chargé par une impédance complexe.

Figure 9: sinusoidale spanningsgenerator belast met een complexe impedantie.

On considère (figure 9) un générateur de tension sinusoïdale d'impédance de sortie $\bar{Z}_S = R_S + jX_S$,

branché sur une charge d'impédance $\bar{Z}_L = R_L + jX_L$ (par exemple, un émetteur raccordé à une antenne). On s'intéresse à la relation qu'il faut avoir entre Z_L et Z_S pour que la puissance fournie par le générateur à la charge soit maximum.

4.2 Impédances de source et de charge purement résistives

On envisage d'abord le cas où les deux impédances sont purement résistives (figure 10).

Soit U_S l'amplitude de la tension à vide du générateur et U_L l'amplitude de la tension aux bornes de la charge. La puissance fournie à la charge vaut, I_L étant l'amplitude du courant dans la charge:

$$P_L = \frac{1}{2} R_L I_L^2 \quad (1)$$

avec

$$I_L = \frac{U_S}{R_S + R_L} \quad (2)$$

Le facteur 1/2 dans (1) provient du fait que l'on travaille ici avec les amplitudes. En remplaçant dans (1), I_L par son expression, on obtient:

$$P_L = \frac{1}{2} R_L \left(\frac{U_S}{R_S + R_L} \right)^2 \quad (3)$$

Soit:

$$P_L = \frac{U_S^2}{2} \frac{R_L}{(R_S + R_L)^2} \quad (4)$$

Si l'on suppose R_S fixe, le problème est de savoir quelle doit être la valeur à donner à R_L pour que la puissance P_L fournie à la charge soit maximum.

4. Aanpassing van impedanties

In het vorige gedeelte hebben we het probleem van de aanpassing van impedanties ingeleid en de begrippen die te maken hebben met impedanties en admittanties opgefrist.

Zo hebben we gezien dat met behulp van een reactantie in serie of parallel, het mogelijk is een impedantie te wijzigen.

In het complexe vlak gebeuren deze wijzigingen door verplaatsingen op een rechte of cirkelboog.

In het volgende artikel zullen we de impedantieaanpassing en zijn toepassing bij de antennekoppelaars verder uitdiepen.

4.1 Ter herinnering

Stel dat we beschikken over een generator met een sinusoidale uitgangsspanning en een uitgangsimpedantie $\bar{Z}_S = R_S + jX_S$,

(figure 9), aangesloten op een belasting $\bar{Z}_L = R_L + jX_L$ (bijvoorbeeld een zender aangesloten op een antenne). Wat is de relatie tussen Z_L en Z_S om een maximale energieoverdracht te verkrijgen tussen de generator en de belasting?

4.2 Bronimpedantie en een pure resistieve belasting.

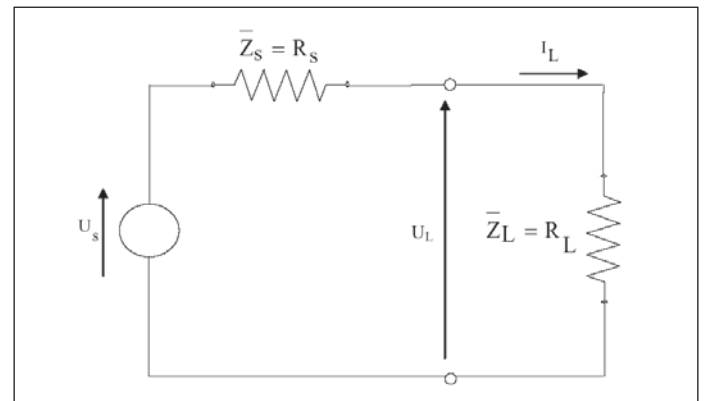


Figure 10: générateur, d'impédance de sortie résistive, chargé par une résistance pure. / Figure 10: generator met een resistieve uitgangsimpedantie, belast met een zuivere weerstand..

We bekijken eerst het geval met twee zuivere resistieve impedanties (figure 10).

Als U_S de amplitude is van de onbelaste uitgangsspanning van de generator en U_L de amplitude aan de klemmen van de belasting, dan is het vermogen geleverd aan de belasting:

$$P_L = \frac{1}{2} R_L I_L^2 \quad (1)$$

met

$$I_L = \frac{U_S}{R_S + R_L} \quad (2)$$

De factor 1/2 in (1) staat er omdat we hier met amplitudes werken. Als we in (1) I_L vervangen door (2) geeft dit:

$$P_L = \frac{1}{2} R_L \left(\frac{U_S}{R_S + R_L} \right)^2 \quad (3)$$

of

$$P_L = \frac{U_S^2}{2} \frac{R_L}{(R_S + R_L)^2} \quad (4)$$

We willen weten bij welke waarde van R_L het vermogen P_L , dat afgeleverd wordt aan de belasting maximaal zal zijn. We veronderstellen daarbij dat R_S een vaste waarde heeft.

Remarquons que si $R_L = 0$ (court-circuit), $P_L = 0$; de même, si $R_L = \infty$ (circuit ouvert), $P_L = 0$ aussi car $I_L = 0$. On a donc bien un maximum pour une certaine valeur de R_L non nulle et non infinie. Mathématiquement, le problème se résout en calculant la dérivée de P_L par rapport à R_L ; la valeur recherchée pour R_L est celle qui annule cette dérivée. On trouve alors que P_L est maximum lorsque la résistance de la charge est égale à celle du générateur.

$$R_L = R_S \quad (5)$$

On voit que la puissance fournie à la charge est maximum lorsque la résistance R_L de la charge est égale à l'impédance de sortie R_S du générateur; dans ce cas, la puissance P_L fournie à la charge est égale à la puissance P_S dissipée dans le générateur et le rendement vaut alors 50 %. Par exemple, un émetteur de 100 W, d'impédance de sortie égale à 50 Ω , et branché sur une charge de 50 Ω , dissipe aussi 100 W (en chaleur) dans son étage de sortie.

La **figure 11** montre comment varie le rendement $\eta = P_L / P_{Tot}$ en fonction du rapport R_L / R_S (P_{Tot} étant la puissance totale fournie par le générateur); la figure montre aussi les courbes de P_L , P_S et P_{Tot} (avec P_{Tot} normalisée à 1 W).

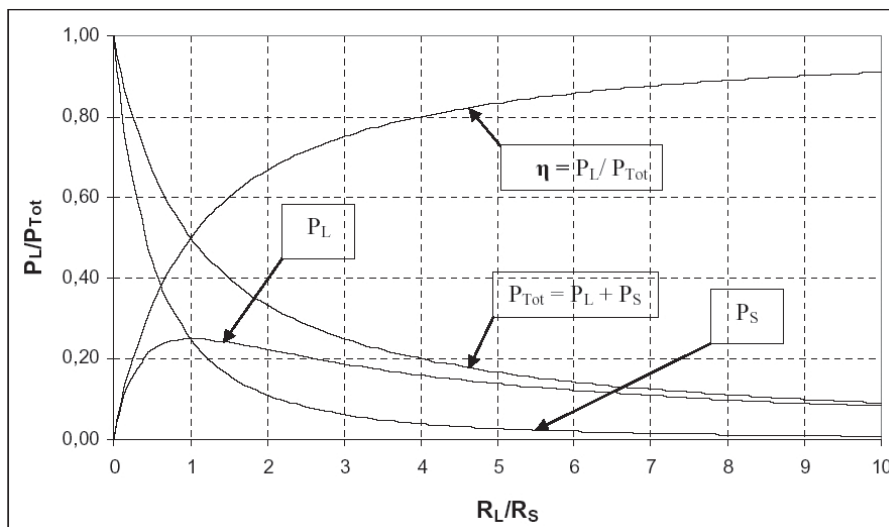


Figure 11: variation du rendement $\eta = PL / PTot$ en fonction du rapport RL / RS ; on voit bien le maximum de PL pour $RL = RS$ (pour les courbes de puissance, $PTot$ a été normalisée à 1 W).

Figure 11: verloop van het rendement $\eta = PL / PTot$ als functie van de verhouding RL / RS ; het is duidelijk dat PL zijn hoogste waarde bereikt bij $RL = RS$ (voor het vermogen werd $PTot$ genormaliseerd ten opzichte van 1W).

La courbe du rendement montre bien que celui-ci n'est pas maximum lorsque la condition $R_L = R_S$ est réalisée; en fait, il ne vaut que 50 %. Pour cette raison, l'adaptation des impédances n'est pas toujours réalisée, en particulier, dans les systèmes de production d'énergie électrique (voir à ce sujet http://www.jaycar.com.au/images_uploaded/impmatch.pdf).

4.3 Impédances de source et de charge quelconques

On envisage maintenant le cas général. En se reportant à la **figure 9**, on voit que la puissance fournie à la charge est encore la puissance P_L dissipée dans la partie résistive R_L de la charge (la partie réactive ne dissipant pas de puissance). On a donc:

$$P_L = \frac{1}{2} R_L I_L^2 \quad (6)$$

Avec

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{U}_S}{(R_S + jX_S) + (R_L + jX_L)} = \frac{\bar{U}_S}{(R_S + R_L) + j(X_S + X_L)} \quad (7)$$

\bar{I}_L et \bar{U}_S étant les amplitudes complexes (amplitudes réelles et phases) du courant dans la charge et de la tension à vide du générateur.

L'amplitude IL du courant vaut:

$$I_L = \frac{U_S}{\sqrt{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2}} \quad (8)$$

La puissance dissipée dans la charge vaut donc:

$$P_L = \frac{1}{2} R_L \frac{U_S^2}{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2} \quad (9)$$

L'expression (9) montre que l'on peut maximiser une première fois la puissance P_L dissipée dans la charge en prenant $X_L = -X_S$.

Merk op dat als $R_L = 0$ (kortsluiting), $P_L = 0$; en als $R_L = \infty$ (open circuit) is $P_L = 0$ omdat $I_L = 0$. Er moet dus een maximum bestaan bij een waarde van R_L tussen nul en oneindig. Wiskundig bestaat de oplossing van het probleem in de berekening van de afgeleide van P_L naar R_L ; de gezochte waarde van R_L is die waarbij deze afgeleide de waarde nul aanneemt. Zo vinden we dat P_L zijn hoogste waarde bereikt als de belastingsweerstand gelijk is aan de bronweerstand.

$$R_L = R_S \quad (5)$$

Men stelt vast dat het geleverde vermogen aan de belasting maximaal is als de belastingsweerstand R_L gelijk is aan de uitgangsimpedantie R_S van de generator; in dat geval is het geleverde vermogen P_L gelijk aan het vermogen P_S dat de generator dissipeert. Het rendement bedraagt dus 50 %. Zo zal bijvoorbeeld de eindtrap van een zender, met een uitgangsimpedantie van 50 Ω , die 100 W aflevert, ook 100 W dissiperen (in warmte).

Figure 11 toont hoe het rendement $\eta = P_L / P_{Tot}$ verloopt als functie van de verhouding R_L / R_S (P_{Tot} is het totale vermogen geleverd door de generator); de grafiek toont ook het verloop van P_L , P_S en P_{Tot} (met P_{Tot} genormaliseerd bij 1 W).

De curve laat zien da het rendement niet maximaal is bij $R_L = R_S$; het bedraagt dan slechts 50 %. Om die reden is een aanpassing van de impe-

danties niet steeds wenselijk. In het bijzonder geldt dit voor systemen die elektrische energie produceren (zie over dit onderwerp ook http://www.jaycar.com.au/images_uploaded/impmatch.pdf).

4.3 Bronimpedanties en een willekeurige belasting

Laat ons nu het algemene geval bekijken. Uit **figure 9** blijkt dat het vermogen geleverd aan de belasting nog steeds het vermogen P_L is, dat gedissipeerd wordt in het resistieve deel R_L van de belasting (het reactieve deel dissipeert immers geen vermogen). Er geldt dus:

$$P_L = \frac{1}{2} R_L I_L^2 \quad (6)$$

met

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{U}_S}{(R_S + jX_S) + (R_L + jX_L)} = \frac{\bar{U}_S}{(R_S + R_L) + j(X_S + X_L)} \quad (7)$$

\bar{I}_L en \bar{U}_S zijn de complexe amplitudes (amplitudes en fases) van de stroom in de belasting en de onbelaste spanning van de generator.

De amplitude IL van de stroom bedraagt:

$$I_L = \frac{U_S}{\sqrt{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2}} \quad (8)$$

Het vermogen dat door de belasting gedissipeerd wordt bedraagt dus:

$$P_L = \frac{1}{2} R_L \frac{U_S^2}{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2} \quad (9)$$

De uitdrukking (9) toont dat we het vermogen P_L in de belasting een eerste maal kunnen maximaliseren door $X_L = -X_S$ te maken.

On a alors:

$$P_L = \frac{1}{2} R_L \frac{U_S^2}{(R_S + R_L)^2} \quad (10)$$

On est alors ramené au cas précédent (l'expression (10) est identique à l'expression (4) du 1er cas). Par conséquent, pour maximiser la puissance fournie à la charge, il faut réaliser les deux conditions suivantes:

$$R_L = R_S \text{ et } X_L = -X_S \quad (11)$$

Soit

$$\bar{Z}_L = R_S - jX_S = \bar{Z}_S^* \quad (12)$$

Il faut donc que l'impédance de la charge soit le complexe conjugué de l'impédance de sortie du générateur; on parle alors d'**adaptation conjuguée** (Rappelons que le complexe conjugué d'un nombre complexe $\bar{Z} = a + jb$ est $\bar{Z}^* = a - jb$).

Exemple

Un émetteur dont l'impédance de sortie est de 50Ω doit fonctionner avec une antenne dont l'impédance vue à travers la ligne reliant l'émetteur à l'antenne vaut $(50 - j100) \Omega$ (figure 12). La fréquence de travail est de $3,65 \text{ MHz}$. On peut donc considérer qu'à la fréquence de travail, le système "ligne - antenne" est équivalent à une résistance de 50Ω en série avec une capacité de 436 pF . On veut assurer un transfert maximum de puissance vers l'antenne.

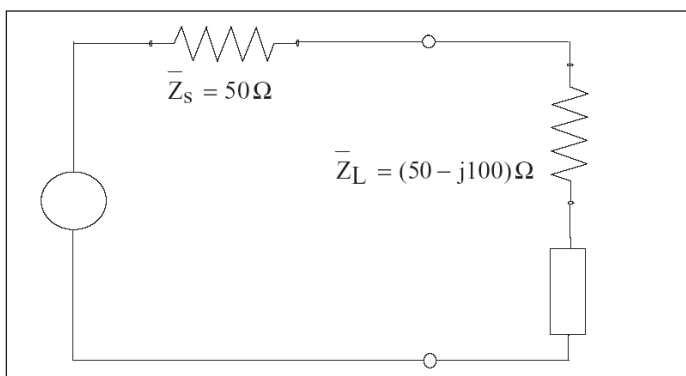


Figure 12. Emetteur chargé par une impédance capacitive.
Figuur 12. Zender belast met een capacitiieve impedantie.

Solution

Comme l'égalité des parties résistives des impédances est déjà réalisée, il suffit, puisque l'impédance de sortie de l'émetteur est purement résistive, d'annuler la partie réactive de l'impédance de la charge. Pour cela, il faut insérer dans le circuit d'alimentation de l'antenne une inductance L dont la réactance à $3,65 \text{ MHz}$ vaut $+100 \Omega$; soit $L = X_L / (2\pi f) = 4,36 \mu\text{H}$ (figure 13) (on suppose ici que l'inductance est parfaite).

4.4 Adaptation par transformateur

Lorsqu'une impédance est branchée aux bornes du secondaire d'un transformateur de rapport de transformation n_p/n_s (figure 14), l'impédance mesurée aux bornes du primaire vaut:

$$\bar{Z} = \bar{Z}_L \left(\frac{n_p}{n_s} \right)^2 \quad (13)$$

En exprimant les impédances sous la forme polaire, on obtient:

$$\bar{Z} = \left(Z_L \angle \varphi_L \right) \left(\frac{n_p}{n_s} \right)^2 = \left[Z_L \left(\frac{n_p}{n_s} \right)^2 \right] \angle \varphi_L = Z \angle \varphi_L \quad (14)$$

Dit geeft:

$$P_L = \frac{1}{2} R_L \frac{U_S^2}{(R_S + R_L)^2} \quad (10)$$

We bevinden ons nu terug in het vorige geval (de uitdrukkingen (10) en (4) zijn dezelfde). Bijgevolg moet om zoveel mogelijk vermogen te leveren aan de belasting, voldaan zijn aan de twee volgende voorwaarden:

$$R_L = R_S \text{ en } X_L = -X_S \quad (11)$$

ofwel

$$\bar{Z}_L = R_S - jX_S = \bar{Z}_S^* \quad (12)$$

De impedantie van de belasting moet dus de complex toegevoegde waarde hebben van de uitgangsimpedantie van de generator. Men spreekt van **geconjugeerde aanpassing** (ter herinnering: de complex toegevoegde of geconjugeerde van $\bar{Z} = a + jb$ is $\bar{Z}^* = a - jb$).

Voorbeeld

Een zender met een uitgangsimpedantie van 50Ω wordt aangesloten op een antenne waarvan de impedantie op het uiteinde van de voedingskabel gelijk is aan $(50 - j100) \Omega$ (figuur 12). De werkfrequentie is $3,65 \text{ MHz}$. Op deze frequentie kan het systeem "voedingslijn-antenne" gezien worden als een weerstand van 50Ω in serie met een capaciteit van 436 pF . Men wil een maximale energieoverdracht bekomen tussen zender en antenne.

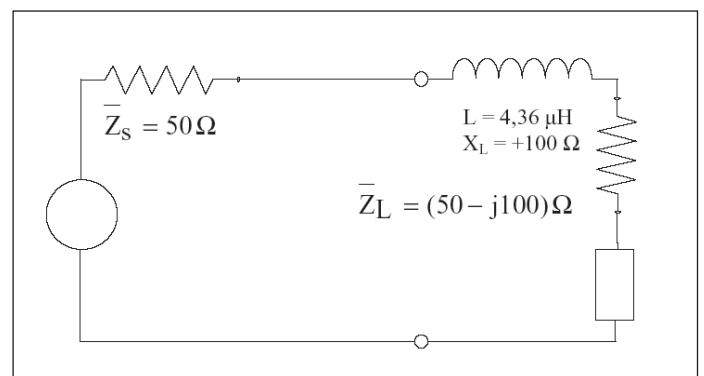


Figure 13. La réactance capacitive a été compensée par une inductance.
Figuur 13. De reactantie wordt gecompenseerd met een spoel.

Oplossing

Daar de gelijkheid van de resistieve delen van de impedanties reeds bestaat, volstaat dat we het reactieve deel van de belastingsimpedantie compenseren. Dat kan door een spoel met een reactantie van $+100 \Omega$ op $3,65 \text{ MHz}$ op te nemen in het voedingsstelsel van de antenne. Of $L = X_L / (2\pi f) = 4,36 \mu\text{H}$ (figuur 13) (we veronderstellen hier een ideale spoel).

4.4 Aanpassing met behulp van een transformator

Als een impedantie aangesloten wordt op de secundaire van een transformator met wikkilverhouding n_p/n_s (figuur 14), zal de impedantie aan de klemmen van de primaire zijn:

$$\bar{Z} = \bar{Z}_L \left(\frac{n_p}{n_s} \right)^2 \quad (13)$$

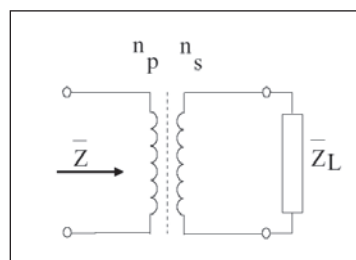


Figure 14. Transformation d'une impédance au moyen d'un transformateur

Figuur 14. Omzetting van een impedantie door middel van een transformator.

Uitgedrukt met poolcoördinaten geeft dit:

$$\bar{Z} = \left(Z_L \angle \varphi_L \right) \left(\frac{n_p}{n_s} \right)^2 = \left[Z_L \left(\frac{n_p}{n_s} \right)^2 \right] \angle \varphi_L = Z \angle \varphi_L \quad (14)$$

Cette dernière relation nous montre que le module de \bar{Z} est égal au module de Z_L multiplié par le carré du rapport de transformation

$\left(\frac{n_p}{n_s}\right)^2$; par contre l'argument ϕ_L n'est pas modifié. Il résulte de cela

que le point représentatif de l'impédance se déplace sur une droite passant par l'origine (**figure 15**).

Dans ce cas, on peut montrer que la puissance fournie par le générateur est maximum lorsque les impédances de source Z_s et de charge Z_L ont le même module ($Z_L = Z_s$).

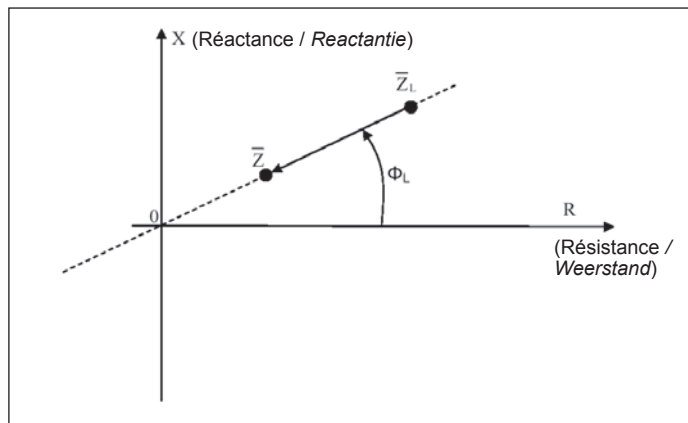


Figure 15. transformation d'une impédance par un transformateur (on a supposé ici un rapport $n_p/n_s < 1$).

Figuur 15. Omzetting van een impedantie met een transformator (we veronderstellen hier een verhouding $n_p/n_s < 1$).

5. Réseau d'adaptation des impédances

Dans la pratique, on a rarement affaire à des cas aussi simples que celui de l'exemple précédent. En général, l'impédance de la charge a une réactance non nulle et une résistance différente de celle du générateur. Dans ce cas, il faut alors effectuer une transformation de l'impédance de la charge, par des mises en série et/ou parallèle avec cette charge, de réactances convenablement choisies; c'est le rôle du réseau d'adaptation des impédances, en particulier, du coupleur d'antenne dans le cas d'un émetteur (**figure 16**).

5.1 Cas general

D'une manière générale, le réseau d'adaptation va transformer l'impédance de la charge en une impédance qui est complexe conjuguée de celle du générateur; on aura ainsi réalisé l'adaptation conjuguée. Dans le cas particulier d'un émetteur avec une impédance de sortie purement résistive (égale à 50 Ω par exemple), l'impédance vue à travers le coupleur d'antenne devra aussi être égale à cette résistance pure. Nous avons vu dans la première partie de cet article que ce réseau d'adaptation devait être composé exclusivement de réactances, puisque des résistances introduiraient des pertes par effet Joule; en réalité, les réactances (inductances ou capacités) ne sont pas parfaites et une partie de la puissance fournie par l'émetteur sera donc perdue en chaleur dans le réseau d'adaptation.

Pour la suite de cet article, nous supposons que les pertes dans les réactances du réseau d'adaptation sont négligeables (ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas).

Le fonctionnement du réseau d'adaptation de la **figure 16** peut être représenté graphiquement dans le plan complexe (**figure 17**). Il faut transformer Z_L de façon à obtenir une impédance égale au complexe conjugué de Z_s , soit $Z_s^* = R_s - jX_s$. La **figure 17** montre qu'en partant du point A (point représentatif de Z_L), il est possible d'arriver au point C (point représentatif de Z_s^*) par divers chemins (théoriquement, il en existe une infinité). Deux de ces chemins parmi les plus simples sont représentés sur la **figure 17**.

Deze vergelijking toont dat de modulus van \bar{Z} gelijk is aan de modulus van Z_L , vermenigvuldigd met het kwadraat van de transformatie-

verhouding $\left(\frac{n_p}{n_s}\right)^2$; het argument ϕ_L daarentegen is ongewijzigd.

Daaruit volgt dat het punt dat de impedantie voorstelt zich verplaatst op een rechte door de oorsprong (**figuur 15**).

In dit geval kan men aantonen dat het vermogen afgeleverd door de generator maximaal is als de impedanties Z_s en Z_L dezelfde modulus hebben ($Z_L = Z_s$).

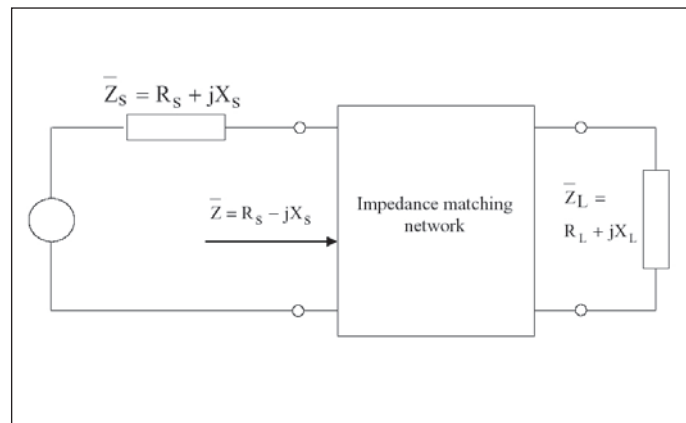


Figure 16. à travers le réseau d'adaptation, le générateur voit une impédance égale au complexe conjugué de Z_s .

Figuur 16. Doorheen het aanpassingsnetwerk ziet de generator een impedantie gelijk aan de complex toegevoegde van Z_s .

5. Impedantieaanpassing met behulp van een netwerk

In de praktijk hebben we zelden te maken met de eenvoudige gevallen die we tot nu toe beschreven hebben. Meestal bestaat de belastingsimpedantie uit een niet te verwaarlozen reactantie en een weerstand die verschillend is van die van de generator. Dan is een aanpassing van de impedantie noodzakelijk met behulp van een gepaste reactantie in serie of parallel met de belasting; dit is de rol van het aanpassingsnetwerk, en in het bijzonder de antennekoppelaar tussen zender en antenne (**figure 16**).

5.1 Het algemene geval

In het algemeen zal het aanpassingsnetwerk de belastingsimpedantie omzetten in een impedantie die de complex toegevoegde heeft van de generatorimpedantie. In het bijzonder geval van een zender met een zuiver resistieve uitgangsimpedantie (bijvoorbeeld 50 Ω), moet de impedantie van de antennekoppelaar daaraan gelijk zijn. In het eerste deel van dit artikel zagen we dat het aanpassingsnetwerk dan uitsluitend bestaat uit pure reactanties. In de realiteit zijn de reactanties (spoelen en capaciteiten) verre van perfect en bevatten ze ook een resistief deel, wat een verlies veroorzaakt door het Joule-effect. Aldus gaat een deel van het geleverde vermogen in het aanpassingsnetwerk onherroepelijk verloren onder de vorm van warmte.

Voor het vervolg van het artikel zullen we veronderstellen dat de verliezen in de reactanties te verwaarlozen zijn (wat spijtig genoeg niet steeds het geval is).

De werking van het aanpassingsnetwerk van **figuur 16** kan grafisch voorgesteld worden in het complexe vlak (**figuur 17**). Men moet Z_L transformeren zodat een impedantie verkregen wordt die gelijk is aan de complex toegevoegde van Z_s , of $Z_s^* = R_s - jX_s$. **Figuur 17** toont dat vertrekkend vanaf punt A (het punt dat Z_L voorstelt), het mogelijk is aan te komen bij punt C (dat Z_s^* voorstelt) via verschillende paden (theoretisch bestaan er oneindig veel). **Figuur 17** toont de twee eenvoudigste paden.

1° Le chemin ABC

En plaçant une inductance L_s en série avec \bar{Z}_L , on passe de A à B; ensuite, une capacité C_p en parallèle avec l'ensemble produit un déplacement dans le sens horlogique sur le cercle de conductance constante passant par B, ce qui nous amène en C, point représentatif de \bar{Z}_S^* . Nous avons ici affaire à un **adaptateur en L direct de type passe-bas**.

2° Le chemin AB'C

En plaçant une inductance L_p en parallèle avec \bar{Z}_L , on passe de A à B' (déplacement dans le sens anti-horlogique sur le cercle de conductance constante passant par A); ensuite, une capacité C_s en série nous amène en C, point représentatif de \bar{Z}_S^* . **Le circuit obtenu constitue un adaptateur en L inversé de type passe-haut**.

En général, il faut au moins deux réactances pour réaliser l'adaptation; on parle alors de réseau en L. On peut utiliser un nombre de réactances plus élevé; pour trois réactances, on parle de réseau en T ou en π . La **figure 18** illustre ces différentes configurations.

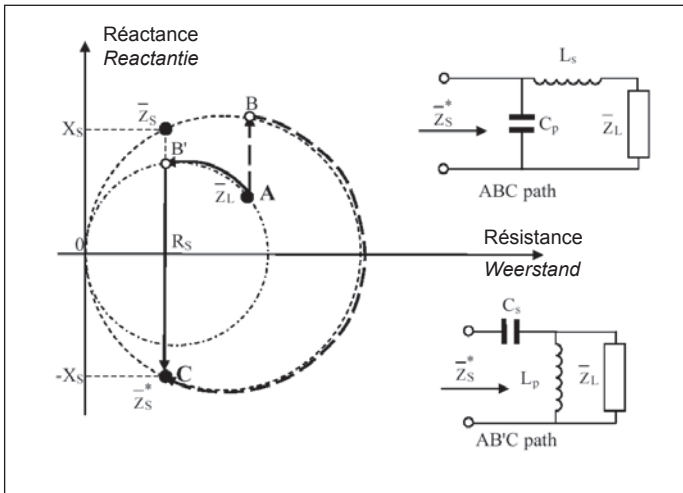


Figure 17. Transformation d'une impédance \bar{Z}_L en une impédance \bar{Z}_S^* , complexe conjugué de \bar{Z}_S . / **Figuur 17. Omzetting van een impedantie \bar{Z}_L in een impedantie \bar{Z}_S^* , complex toegevoegde van \bar{Z}_S .**

5.2 Coupleur d'antenne

Considérons, en guise de transition vers la troisième partie de cet article, le cas de la figure 11 dans lequel une antenne est reliée par une ligne à un émetteur dont l'impédance de sortie est supposée purement résistive et égale à R_S (50 Ω par exemple). L'impédance Z_A de l'antenne est transformée par la ligne en une impédance Z_L . Un coupleur est intercalé entre l'émetteur et la ligne pour réaliser l'adaptation des impédances. Ce coupleur doit transformer l'impédance Z_L de la charge en une impédance R_S purement résistive.

L'impédance \bar{Z}_L , a priori quelconque, est représentée sur la **figure 20**, par le point A. Le point C, correspondant à une résistance R_S , représente l'impédance de sortie de l'émetteur. Une configuration de coupleur (L, T, PI ...) est représentée dans le plan complexe par un chemin reliant A à C, ce chemin étant composé de segments de droite (réactances en série) et d'arcs de cercle (réactances en parallèle).

Deux lieux particuliers sont représentés à la **figure 20**.

- La droite de résistance constante $R = R_S$. Tous les points de cette droite correspondent à des impédances dont la partie résistive est égale à R_S . Pour une impédance représentée par le point B par exemple (et en général par des points au-dessus de l'axe des R), la mise en série d'une capacité avec cette impédance suffit pour passer au point C (R_S); dans le cas des points de la droite en dessous de l'axe des R (tel que B'), il faudrait utiliser une inductance.
- Le cercle de conductance constante $G = G_S = 1/R_S$. Tous les points de ce cercle correspondent à des impédances pour lesquelles la conductance (partie réelle de l'admittance correspondante) est égale à $1/R_S$ (voir 1ère partie de cet article). Pour une impédance représentée par le point

1° Het pad ABC

Door een spoel L_s in serie te plaatsen met \bar{Z}_L , gaan we van A naar B; daarna plaatsen we een capaciteit C_p parallel met het geheel. Dit veroorzaakt een verplaatsing in wijzerzin op de conductantiecirkel die door B gaat. Zo bereiken we punt C, dat staat voor \bar{Z}_S^* . We hebben hier te maken met een aanpassing met behulp van een "**L-laagdoorlaatfilter**".

2° Het pad AB'C

We plaatsen de spoel L_p parallel met \bar{Z}_L . Zo komen we van A terecht in B' (verplaatsing in tegenwijzerzin op de cirkel van constante geleiding door A); met de capaciteit C_s in serie komen we terecht in punt C, dat staat voor \bar{Z}_S^* . Deze schakeling vormt een aanpassingsnetwerk van het type "**omgekeerde L-hoogdoorlaatfilter**".

Meestal volstaan twee reactanties om de aanpassing te kunnen uitvoeren. Men spreekt dan van een L-netwerk. Zijn er meer dan twee reactanties, dan spreekt men van T- of π -netwerk. **Figuur 18** illustreert de verschillende configuraties.

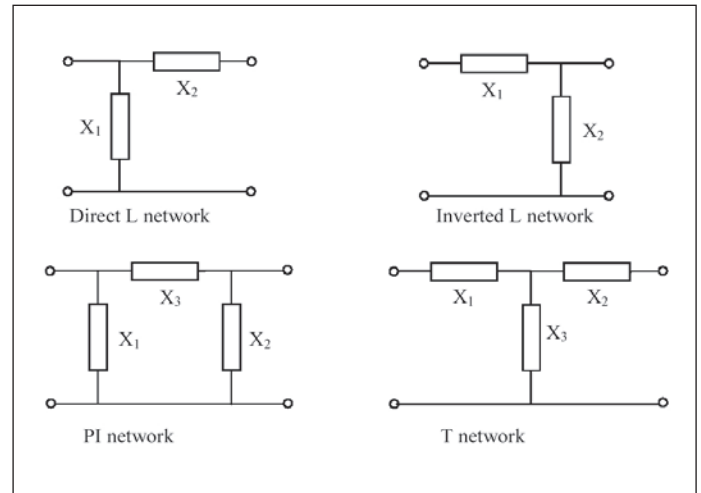


Figure 18. réseaux d'adaptation d'impédances à 2 et 3 réactances

Figuur 18. Aanpassingsnetwerken met 2 en 3 reactanties

5.2 De antennekoppelaar

Bij wijze van inleiding tot het derde deel van dit artikel, staan we even stil bij figuur 11: een antenne is via een voedingslijn verbonden met een zender waarvan de uitgangsimpedantie zich gedraagt als een pure weerstand (bijvoorbeeld 50 Ω). De voedingslijn transformeert de impedantie Z_A van de antenne in een impedantie Z_L . Een antennekoppelaar tussen de zender en de voedingslijn moet zorgen voor de impedantieaanpassing. Hij moet de impedantie Z_L aanpassen aan de zuivere resistieve impedantie R_S .

De impedantie \bar{Z}_L is in **figuur 20** voorgesteld door het punt A. Het punt C stemt overeen met de weerstand R_S , de uitgangsimpedantie van de zender. Het aanpassingsnetwerk (L, T, PI ...) wordt in het complexe vlak voorgesteld door een pad dat A met C verbindt. Het pad bestaat uit segmenten van rechten (reactanties in serie) en cirkelbogen (reactanties in parallel).

In het bijzonder toont **figuur 20**:

- De rechte die de weerstand $R = R_S$ voorstelt. Alle punten op deze rechte komen overeen met impedanties waarvan het resistieve deel gelijk is aan R_S . Voor bijvoorbeeld de impedantie voorgesteld door het punt B (en in het algemeen, alle punten boven de R-as) volstaat een capaciteit in serie voor een verplaatsing naar het punt C (R_S); voor de punten van de rechte die zich onder de R-as bevinden (zoals B'), is een spoel nodig.
- De conductantiecirkel $G = G_S = 1/R_S$. Alle punten op deze cirkel komen overeen met impedanties waarvoor de conductantie (het reële deel van overeenstemmende admittantie) gelijk is aan $1/R_S$ (zie het 1ste deel van dit artikel). Voor bijvoorbeeld de impedantie voorgesteld door het

D par exemple (et en général par des points du demi-cercle supérieur), la mise en parallèle d'une capacité avec cette impédance suffira pour arriver au point C; pour les points du demi-cercle inférieur (tel que E par exemple), il faudrait utiliser une inductance.

Pour revenir maintenant à l'impédance \bar{Z}_L , la **figure 20** nous montre deux exemples de transformations possibles, donnant lieu dans ce cas, à des coupleurs en L.

1° Le chemin ABC

En plaçant une inductance L_p en parallèle avec \bar{Z}_L , on passe de A à B en suivant dans le sens anti-horlogique le cercle passant par A; ensuite, une capacité C_s en série avec l'ensemble produit le déplacement de B à C.

2° Le chemin AB'C

En plaçant une capacité C_p en parallèle avec \bar{Z}_L , on passe de A à B' en suivant dans le sens horlogique le cercle passant par A; ensuite, une inductance L_s en série nous amène en C.

Une autre transformation possible est représentée par le chemin AA'B''C; elle correspond à un coupleur en T de type passe-haut (capacités dans les branches série et inductance dans la branche parallèle). Le chemin AD'DC représente un coupleur en PI de type passe-bas (capacités dans les branches parallèles et inductance dans la branche série). Les schémas correspondant à ces différentes transformations sont donnés à la **figure 21**.

A la **figure 20**, le point A représentatif de l'impédance \bar{Z}_L a été arbitrairement placé à droite du lieu $R=R_s$. D'autres solutions de coupleurs en L auraient été obtenues si ce point A avait été placé à gauche de ce lieu; une distinction est aussi à faire en fonction de la position du point A par rapport au cercle $G=G_s=1/R_s$ (à l'intérieur ou à l'extérieur). Afin de voir quelles sont les solutions qui se présentent en fonction de \bar{Z}_L , il y a lieu de faire une étude plus détaillée des différentes zones du plan complexe définies par les deux lieux $R=R_s$ et $G=G_s$. Ce sera l'objet de la troisième partie de cet article.

ON5WF
a.liegeois@skynet.be

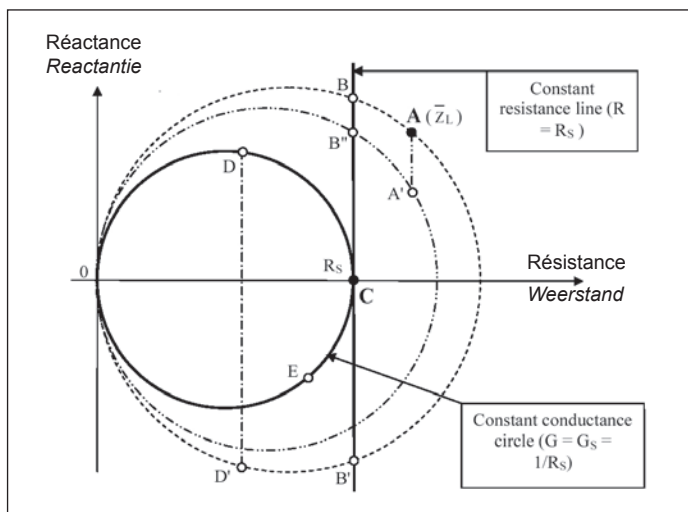


Figure 20. Transformation par le coupleur d'antenne, de l'impédance \bar{Z}_L (point A) en l'impédance R_s (point C).
Figuur 20. Omzetting met een antennekoppelaar van de impedantie \bar{Z}_L (punt A) naar de impedantie R_s (punt C).

punt D (en in het algemeen alle punten van de bovenste halve cirkel), volstaat een capaciteit in parallel voor een verplaatsing naar punt C; voor de punten van de onderste halve cirkel (zoals E), is opnieuw een spoel nodig.

Om terug te komen op de impedantie \bar{Z}_L : **figuur 20** toont twee mogelijke transformaties die gerealiseerd kunnen worden met aanpassingsnetwerken van het type L.

1° Het pad ABC

Met een spoel L_p in parallel met \bar{Z}_L komt men van A in B door een verplaatsing in tegenwijzerzin op de cirkel door A; daarna veroorzaakt de capaciteit C_s in serie de verplaatsing van B naar C.

2° Het pad AB'C

Met de capaciteit C_p parallel met \bar{Z}_L komt men van A in B' door een verplaatsing in wijzerzin op de cirkel door A; daarna veroorzaakt de spoel L_s in serie de verplaatsing naar C.

Nog een ander mogelijke transformatie is voorgesteld door het pad AA'B''C; dit komt overeen met een hoogdoorlaatfilter van het type T (capaciteiten in de seriearmen en spoelen in de parallelarmen). Het pad AD'DC stelt dan weer een laagdoorlaatfilter van het PI-type voor (capaciteiten in de parallelarmen en spoelen in de seriearmen). De schema's zijn opgenomen in **figuur 21**.

In **figuur 20** werd het punt A, dat staat voor de impedantie \bar{Z}_L , rechts geplaatst van het punt waar $R=R_s$. Andere oplossingen van L-netwerken zouden we bekommen indien we A links geplaatst hadden

van dat punt; tevens moet een onderscheid gemaakt worden naargelang de ligging van A ten opzichte van de cirkel $G=G_s=1/R_s$ (binnen of buiten de cirkel). Een gedetailleerde studie van de zones in het complexe vlak die begrensd worden door $R=R_s$ et $G=G_s$ is nodig om een zicht te krijgen op de oplossingen die zich aanbieden als functie van \bar{Z}_L . Dit zal behandeld worden in het derde deel van dit artikel.

ON5WF
a.liegeois@skynet.be

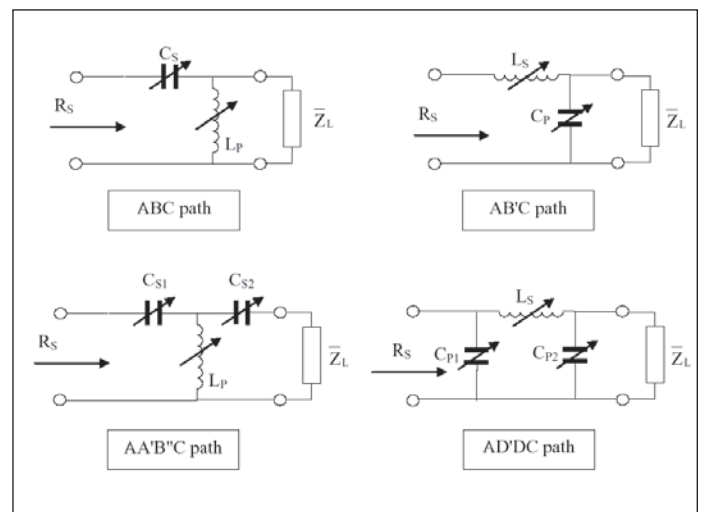


Figure 21. Schémas des coupleurs correspondant aux transformations de la figure 12
Figuur 21. Schema's van de koppelaars die overeenkomen met de aanpassingen van figuur 12