Impedantie-aanpassing toegepast op antennekoppelaars
Adaptation des impedances application aux coupleurs d'antennes

(deel/partie 3)

Door/par ON5WF (MNS) - Vertaald door ON5UK

*In het eerste deel van dit artikel hebben we het probleem van de aanpassing van impedanties ingeleid en enkele essentiële begrippen in verband met admittanties en impedanties opgefrist. Wij hebben gezien dat door het plaatsen van een **reactantie** in serie of parallel met de impedantie de resistieve component (enkel in het geval van een parallelschakeling) en de reactieve component ervan wijzigt. In het vlak van de complexe getallen worden deze transformaties voorgesteld door segmenten van rechten (serieschakeling) of cirkels (parallelschakeling). In het tweede deel hebben we de aanpassing bestudeerd van impedanties in het algemeen en toegepast op de antennekoppelaars. Het derde deel is gewijd aan de studie van de antennekoppelaars in het complexe vlak en meer in het bijzonder de L-netwerken.*

Herinner u dat we te maken hebben met ideale reactanties. Om redenen die we aangehaald hebben in het eerste deel zullen we geen gebruik maken van het Smith-diagram.

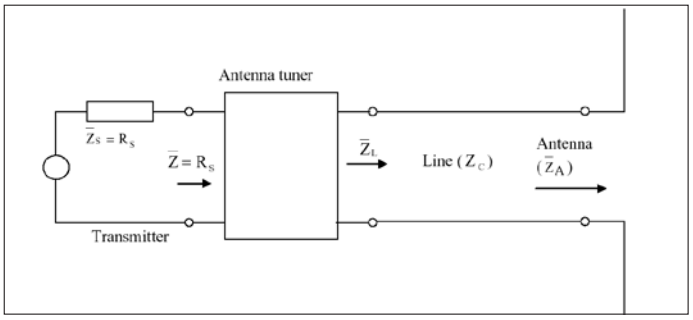
6. Achter de schermen van de antennekoppelaar

We herinneren ons dat de antennekoppelaar de impedantie $\overline{Z}_L$ die aangesloten moet worden op de zender, omzet in een complexe impedantie die de toegevoegde is van die van de zender.
Noteer dat de antennekoppelaar de impedantie van de antenne niet wijzigt. Als ze gelijk is aan een zuivere weerstand met waarde R_S zal de impedantie gezien doorheen de antennekoppelaar eveneens gelijk zijn aan R_S (**figuur 22**). In het complexe vlak van de impedanties wordt de antennekoppelaar voorgesteld door een pad dat de punten die $\overline{Z}_L$ en R_S voorstellen, met elkaar verbindt. Dit pad bestaat uit lijnsegmenten en cirkelbogen.

Figuur 23 laat nog eens de verschillende impedantieomzettingen zien die we kunnen verwezenlijken door een reactantie in serie of parallel te plaatsen. Het geval van een transformator is eveneens afgebeeld.

Voor het vervolg van het verhaal veronderstellen we dat de uitgangsimpedantie van de zender zuiver resistief en gelijk aan R_S is, bijvoorbeeld 50 Ω.

De ideale situatie is die waarbij de antenneimpedantie $\overline{Z}_A$ en de karakteristieke kabelimpedantie Z_C (eveneens zuiver resistief verondersteld) gelijk zijn aan R_S.
Een antennekoppelaar is dan overbodig. Deze ideale situatie komt uiteraard weinig voor in onze amateuromgeving.



Figuur 22: een zender verbonden met een antenne door middel van een koppelaar; we veronderstellen dat de uitgangsimpedantie van de zender een zuivere weerstand is gelijk aan R_S.

Figure 22: un émetteur relié à une antenne par l'intermédiaire d'une ligne et d'un coupleur; l'impédance de sortie de l'émetteur est supposée purement résistive et égale à R_S.

*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. Nous avons vu qu'en plaçant une **réactance** en série ou en parallèle avec une impédance, on pouvait modifier les parties résistive (dans le cas de la mise en parallèle uniquement) et réactive de cette impédance; ces transformations étant matérialisées dans le plan complexe par des segments de droite (mise en série) ou des arcs de cercle (mise en parallèle). Dans la 2ème partie de cet article, nous avons étudié l'adaptation des impédances d'une façon générale et introduit son application aux coupleurs d'antennes. Cette 3ème partie sera donc consacrée à l'étude des coupleurs d'antennes à partir du plan complexe et plus particulièrement, les coupleurs à réseau en L.*

Rappelons au passage que nous supposons ici avoir affaire à des réactances parfaites. Par ailleurs nous n'utilisons pas l'abaque de Smith dans le cadre de cet article, pour des raisons exposées dans la 1ère partie.

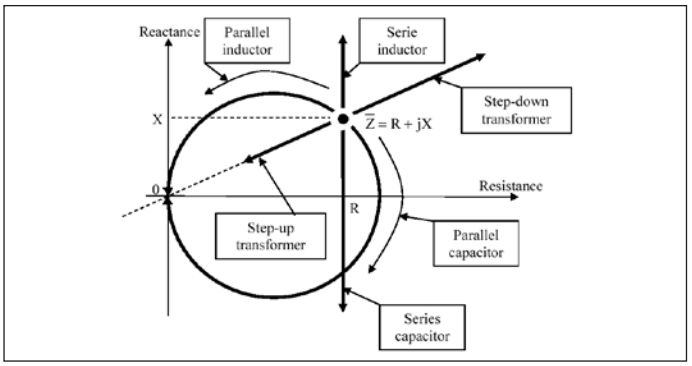
6. Dans les coulisses des coupleurs d'antennes

Rappelons que le rôle du coupleur consiste à transformer l'impédance $\overline{Z}_L$ présentée par la ligne reliant l'émetteur à l'antenne, en une impédance complexe conjuguée de l'impédance de sortie de l'émetteur. Il faut bien noter que l'impédance de l'antenne n'est absolument pas modifiée par le coupleur. Si cette impédance de sortie est purement résistive et égale à R_S, l'impédance vue à travers le coupleur doit être égale à R_S (**figure 22**). Dans le plan complexe des impédances, le coupleur est représenté par un chemin reliant le point représentatif de $\overline{Z}_L$ au point représentatif de R_S, ce chemin étant constitué de segments de droite et/ou d'arcs de cercle.

La **figure 23** nous rappelle les différentes transformations que l'on peut faire subir à une impédance en mettant une réactance en série ou en parallèle avec cette impédance; le cas d'un transformateur y est aussi pris en compte.

Nous supposerons pour la suite que l'impédance de sortie de émetteur est purement résistive et égale à R_S, 50 Ω par exemple.

La situation idéale est celle dans laquelle l'impédance $\overline{Z}_A$ de l'antenne et l'impédance caractéristique Z_C (supposée purement résistive) de la ligne sont égales à R_S, auquel cas le coupleur d'antenne n'est pas nécessaire. Cette situation idyllique est évidemment rarement présente dans les installations d'amateurs.



Figuur 23: de verschillende mogelijkheden om een impedantie om te zetten naar een andere met behulp van reactanties.

Figure 23: les différentes possibilités de modifier une impédance au moyen de réactances.

In het algemeen zal de configuratie van de koppelaar afhangen van te transformeren waarde van de impedantie $\overline{Z}_L$, en zijn verhouding ten opzichte van de impedantie R_S; anders gezegd, van de positie in het complexe vlak van het punt dat $\overline{Z}_L$ voorstelt ten opzichte van het punt dat R_S voorstelt.

6.1 De vier zones van het vlak

Afhankelijk van de waarde van de impedantie $\overline{Z}_L = R_L + jX_L$ (en aldus als functie van de ligging in het complexe vlak van het punt dat de impedantie voorstelt) bestaan verschillende oplossingen voor de transformatie ervan. Het complexe vlak kunnen we verdelen in vier zones (**figuur 24**).

6.1.1 Zone 1: alle impedanties waarvoor $R_L > R_S$, wat de waarde van X_L ook weze. Het is het deel van het vlak dat rechts ligt van de verticale lijn door R_S.

Voorbeeld: $\overline{Z}_L = (75 + j100)\ \Omega$ *met $R_S = 50\ \Omega$.*

6.1.2 Zone 2: de zone binnen de cirkel die de constante conductantie $G = G_S = 1/R_S$ voorstelt. Alle punten binnen deze cirkel stemmen overeen met admittanties waarvoor $G > G_S$.

Herinner u dat voor een impedantie $\overline{Z} = R + jX$, de admittantie gedefinieerd wordt als

$$\overline{Y} = \frac{1}{\overline{Z}} = \frac{1}{R + jX} = G + jS \text{, met } G = \frac{R}{R^2 + X^2}$$

(de conductantie) en $S = -\dfrac{X}{R^2 + X^2}$ (de susceptantie).

Voorbeeld: $\overline{Z}_L = R_L + jX_L = (25 - j20)\ \Omega$ met $R_S = 50\ \Omega$.

In dat geval geldt $G_S = 1/R_S = 0{,}02$ S en

$$\overline{Y}_L = G_L + jS_L = \frac{1}{\overline{Z}_L} = \frac{1}{25 - j20} = (0{,}0244 + j0{,}0195)\,S;$$

en aldus is $G_L = 0{,}0244 > G_S$.

6.1.3 Zone 3+: het deel van het vlak waarvoor de impedanties

$\overline{Z}_L = R_L + jX_L$ voldoen aan de criteria:

$R_L \le R_S$, $G_L \le G_S$ en X_L (of φ) > 0.

Voorbeeld: $\overline{Z}_L = R_L + jX_L = (30 + j100)\ \Omega$

met $R_S = 50\ \Omega$. In dit geval is

$$\overline{Y}_L = G_L + jS_L = \frac{1}{\overline{Z}_L} = \frac{1}{30 + j100} = (0{,}00275 - j0{,}00917)\,S.$$

6.1.4 Zone 3–: zelfde criteria als voor de zone 3+ maar X_L (of φ) < 0.

Voorbeeld: $\overline{Z}_L = R_L + jX_L = (30 - j100)$ met $R_S = 50\ \Omega$. Dan is

$$\overline{Y}_L = G_L + jS_L = \frac{1}{\overline{Z}_L} = \frac{1}{30 - j100} = (0{,}00275 + j0{,}00917)\,S.$$

6.2 Oplossingen met een l-netwerk

Laat ons starten met de studie van de eenvoudigste oplossing: de koppelaars met L-netwerken.

6.2.1 Oplossingen voor de zone 1

We hebben een impedantie $\overline{Z}_L$ voorgesteld door het punt A in de zone 1 (**figuur 25**). Ze moet door middel van reactanties omgezet worden naar

D'une façon générale, la configuration à adopter pour le coupleur dépendra de la valeur de l'impédance $\overline{Z}_L$ à transformer, considérée par rapport à l'impédance finale R_S; ou autrement dit, de la position dans le plan complexe, du point représentatif de $\overline{Z}_L$ par rapport au point représentatif de R_S.

6.1 Les quatres zones du plan

En fonction de l'impédance $\overline{Z}_L = R_L + jX_L$ à transformer (donc, en fonction de la position dans le plan complexe du point représentatif de cette impédance), un certain nombre de solutions existent. Pour étudier ces différentes solutions, le plan complexe peut être divisé en quatre zones (**figure 24**).

6.1.1 La zone 1: elle concerne toutes les impédances pour lesquelles $R_L > R_S$ quelque soit X_L. C'est donc la partie du plan située à droite de la parallèle à l'axe des X passant par R_S.

Exemple: $\overline{Z}_L = (75 + j100)\ \Omega$ *avec $R_S = 50\ \Omega$.*

6.1.2 La zone 2: c'est la zone située à l'intérieur du cercle correspondant à une conductance constante $G = G_S = 1/R_S$. Pour tous les points situés à l'intérieur de ce cercle, les admittances correspondantes présentent une conductance $G > G_S$.

Rappelons que pour une impédance $\overline{Z} = R + jX$, on définit l'admittance

$$\overline{Y} = \frac{1}{\overline{Z}} = \frac{1}{R + jX} = G + jS \text{, avec } G = \frac{R}{R^2 + X^2}$$

(la conductance) et $S = -\dfrac{X}{R^2 + X^2}$ (la susceptance).

Exemple: $\overline{Z}_L = R_L + jX_L = (25 - j20)\ \Omega$ avec $R_S = 50\ \Omega$..

Dans ce cas, nous avons $G_S = 1/R_S = 0{,}02$ S et

$$\overline{Y}_L = G_L + jS_L = \frac{1}{\overline{Z}_L} = \frac{1}{25 - j20} = (0{,}0244 + j0{,}0195)\,S;$$

on a donc bien $G_L = 0{,}0244 > G_S$.

6.1.3 La zone 3+: c'est la zone couvrant la partie du plan dans laquelle

les impédances $\overline{Z}_L = R_L + jX_L$ répondent aux critères

suivants: $R_L \le R_S$, $G_L \le G_S$ et X_L (ou φ) > 0.

Exemple: $\overline{Z}_L = R_L + jX_L = (30 + j100)\ \Omega$

avec $R_S = 50\ \Omega$.. Dans ce cas, nous avons

$$\overline{Y}_L = G_L + jS_L = \frac{1}{\overline{Z}_L} = \frac{1}{30 + j100} = (0{,}00275 - j0{,}00917)\,S.$$

6.1.4 La zone 3–: mêmes critères que pour la zone 3+ sauf X_L (ou φ) qui est < 0.

Exemple: $\overline{Z}_L = R_L + jX_L = (30 - j100)$ avec $R_S = 50\ \Omega$. Dans ce cas, nous avons

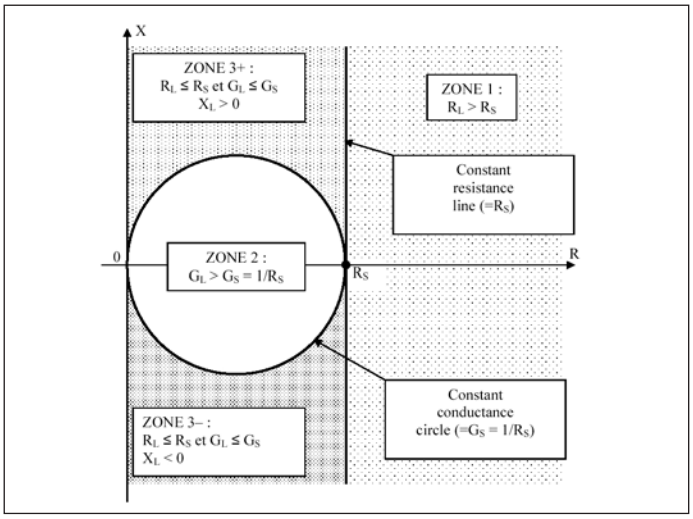
$$\overline{Y}_L = G_L + jS_L = \frac{1}{\overline{Z}_L} = \frac{1}{30 - j100} = (0{,}00275 + j0{,}00917)\,S.$$

6.2. Les solutions avec réseau en l

Nous étudierons ici dans un premier temps, les solutions les plus simples, c'est-à-dire les coupleurs en L.

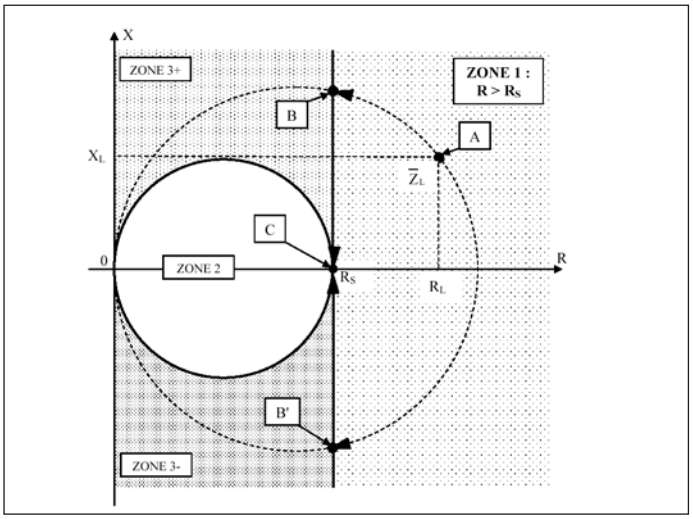
6.2.1 Solutions dans la zone 1

On considère une impédance $\overline{Z}_L$ située dans la zone 1 au point A (**figure 25**). Cette impédance doit être transformée au moyen de réactances en



Figuur 24: het complexe vlak kan verdeeld worden in 4 zones

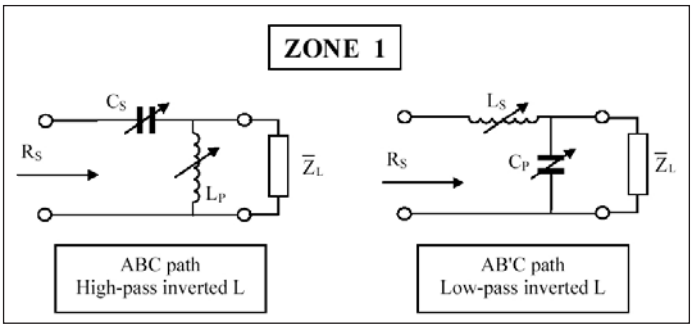
Figure 24: le plan complexe peut être divisé en 4 zones



Figuur 25: een impedantie $\overline{Z}_L$, voorgesteld door punt A in de zone,moet omgezet worden in een impedantie R_S (punt C).

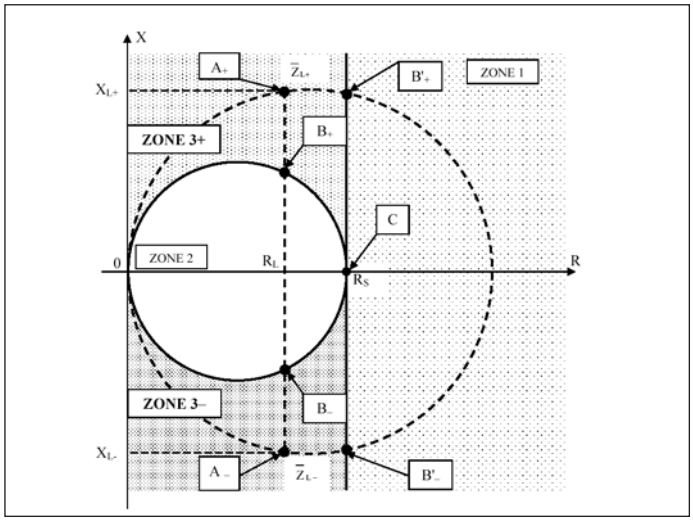
Figure 25: une impédance $\overline{Z}_L$ située au point A dans la zone 1 doit être transformée en une impédance égale à R_S (point C).

een impedantie R_S voorgesteld door het punt C. **Figuur 25** toont dat we C kunnen bereiken vanuit A langs twee verschillende paden: het pad ABC (een spoel parallel met $\overline{Z}_L$ en een capaciteit in serie met het geheel) en het pad AB'C (een capaciteit parallel met $\overline{Z}_L$ en een spoel in serie met het geheel). **Figuur 26** toont de schema's van beide koppelnetwerken.



Figuur 26: de twee configuraties in L die een aanpassing van $\overline{Z}_L$ in de zone 1 aan de uitgangsimpedantie R_S van de zender mogelijk maken.

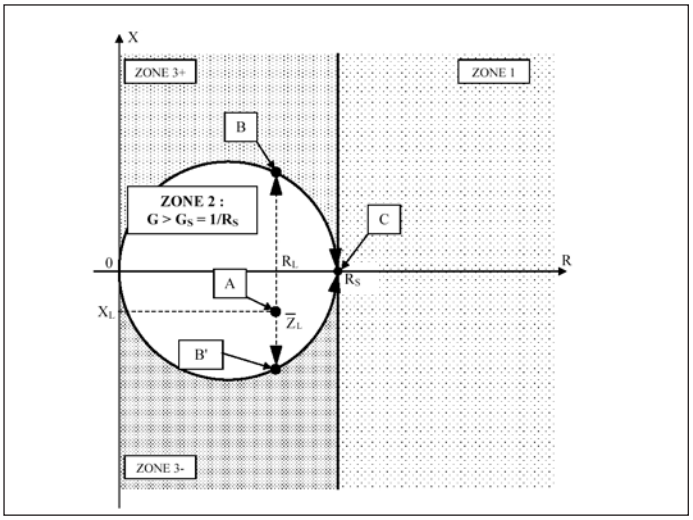
Figure 26: les deux configurations de coupleur en L permettant d'adapter une impédance Z_L de la zone 1 à l'impédance de sortie R_S de l'émetteur.



Figuur 29: in het geval van de zones 3+ et 3– zijn er vier mogelijke paden om terecht te komen in het punt C.

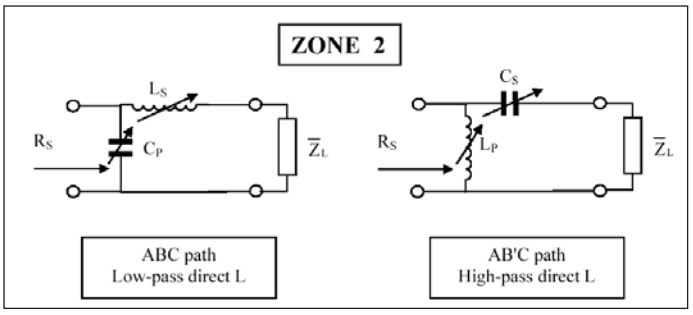
Figure 29: dans le cas des zones 3+ et 3–, on dispose de quatre chemins pour rejoindre le point C.

une impédance égale à R_S représentée par le point C. L'observation de la **figure 25** montre qu'en partant du point A, nous pouvons arriver au point C en empruntant deux chemins: les chemins ABC (une inductance en parallèle sur $\overline{Z}_L$ et une capacité en série avec le tout) et AB'C (une capacité en parallèle sur $\overline{Z}_L$ et une inductance en série avec le tout). Les schémas des deux coupleurs correspondants sont donnés à la **figure 26**.



Figuur 27: vertrekkend uit punt A ($\overline{Z}_L$) in de zone 2, kan men naar punt C (R_S) gaan via de paden ABC en AB'C.

Figure 27: en partant du point A ($\overline{Z}_L$) dans la zone 2, on peut arriver au point C (R_S) par les chemins ABC et AB'C.



Figuur 28: de twee configuraties in L voor de aanpassing van de impedantie $\overline{Z}_L$ in de zone 2 aan de uitgangsimpedantie R_S van de zender.

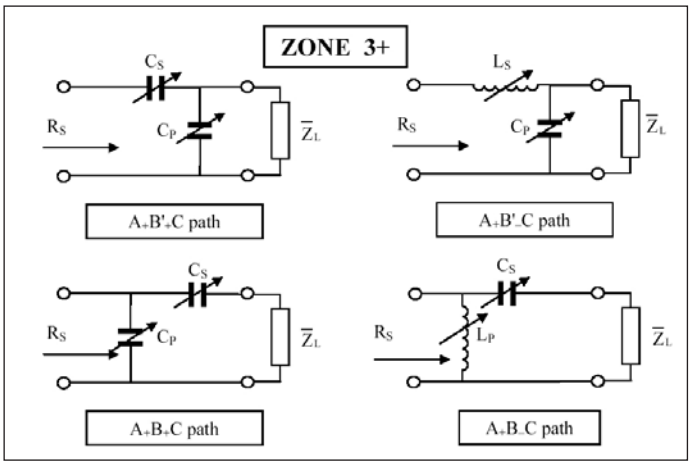
Figure 28: les deux configurations de coupleur en L permettant d'adapter une impédance Z_L de la zone 2 à l'impédance de sortie R_S de l'émetteur.

6.2.2 Oplossingen voor de zone 2

De impedantie $\overline{Z}_L$ (punt A) ligt in zone 2 (**figuur 27**). Er bestaan opnieuw twee mogelijke wegen om naar punt C te gaan; zie **figuur 28** voor de overeenstemmende configuraties van de koppelnetwerken.

6.2.3 Oplossingen voor de zones 3+ en 3–

We bekijken nu de gevallen van een impedantie $\overline{Z}_{L+}$ (punt A_+) in de zone 3+ en een impedantie $\overline{Z}_{L-}$ (punt A_-) in de zone 3– (**figuur 29**). We merken dat er (voor elk van de twee zones) vier mogelijke wegen zijn om van de impedantie $\overline{Z}_L$ naar de impedantie R_S (punt C) te gaan. Er zijn dus ook vier mogelijke netwerkconfiguraties. De overeenkomstige schema's zijn opgenomen in de **figuren 30** (zone 3+) en **31** (zone 3–).



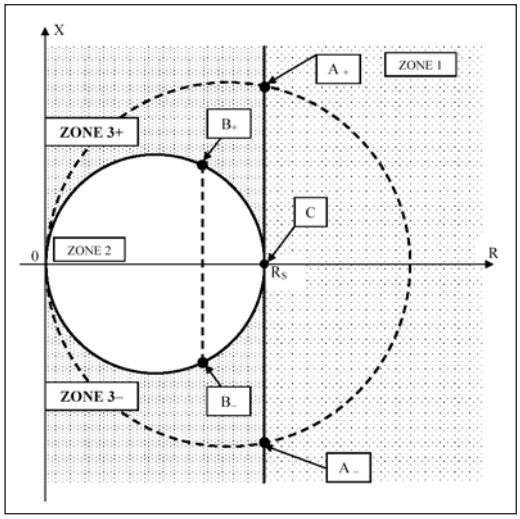
Figuur 30: de schema's van de vier koppelnetwerken voor de zone 3+.
Figure 30: les quatre schémas de coupleurs pour la zone 3+.

6.2.4 Bijzondere gevallen

Een eerste bijzonder geval is dat waarbij $R_L = R_S$ met $X_L \neq 0$; het betreft de impedanties die voorgesteld worden door de punten op de rechte $R = R_S$ (zoals de punten B'_+ et B'_- in **figuur 29**) met uitzondering van het punt C.

Een tweede bijzonder geval is dat waarbij $G_L = 1/R_S$ met $X_L \neq 0$; dit zijn de impedanties die voorgesteld worden door de punten van de cirkel $G = 1/R_S$ (zoals de punten B_+ et B_- in **figuur 29**) met uitzondering van punt C.

We bekijken van wat nader het speciale geval n° 1. Het geval n° 2 verklaart zichzelf op gelijkaardige wijze. Beschouwen we in **figuur 32** bijvoorbeeld het punt A_+ dat staat voor de impedantie $\overline{Z}_L$ en waarvoor $R_L = R_S$ en $X_L > 0$. Het punt C kan rechtstreeks bereikt worden door een capaciteit C_S in serie te plaatsen met $\overline{Z}_L$; een andere manier om C te bereiken is een capaciteit C_P parallel plaatsen met $\overline{Z}_L$ om via een cirkelboog terecht te komen in het punt A_-, en vervolgens de spoel L_S in serie te plaatsen met het geheel om C te bereiken. Een gelijkaardige redenering is toepasbaar op het punt A_-, dat een impedantie $R_L = R_S$ met $X_L < 0$ voorstelt. De overeenkomstige L-koppelaars zijn te zien in **figuur 33**. **Figuur 34** toont de schema's van het bijzondere geval n° 2.



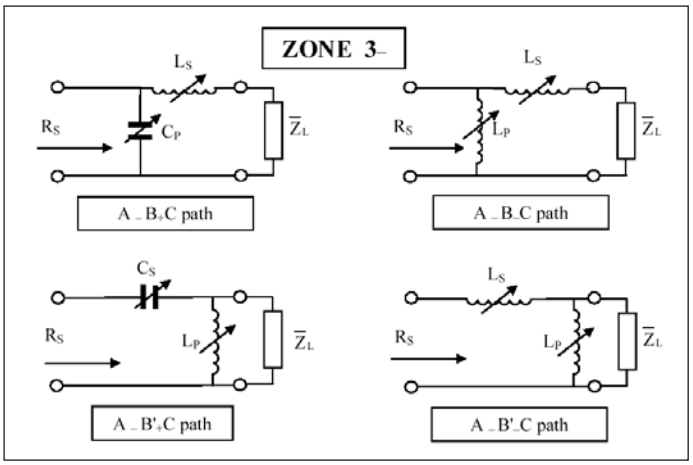
Figuur 32: *de punten A_+ et A_- horen bij het bijzonder geval n° 1; de punten B_+ et B_- bij het bijzonder geval n° 2.*

6.2.2 Solutions dans la zone 2

En partant le l'impédance $\overline{Z}_L$ (point A) située dans la zone 2 (**figure 27**), on a de nouveau deux chemins possibles pour arriver au point C; d'où les deux configurations de coupleurs correspondantes données à la **figure 28**.

6.2.3 Solutions dans les zones 3+ et 3–

On considère ici une impédance $\overline{Z}_{L+}$ (point A_+) dans la zone 3+ et une impédance $\overline{Z}_{L-}$ (point A_-) dans la zone 3– (**figure 29**). L'observation de la figure montre que l'on dispose ici (pour chacune des deux zones) de quatre chemins pour passer de l'impédance $\overline{Z}_L$ à l'impédance R_S du point C. Il y a donc quatre configurations de coupleurs possibles. Les schémas correspondants sont donnés aux **figures 30** (zone 3+) et **31** (zone 3–).



Figuur 31: de schema's van de vier koppelnetwerken voor de zone 3–.
Figure 31: les quatre schémas de coupleurs pour la zone 3–.

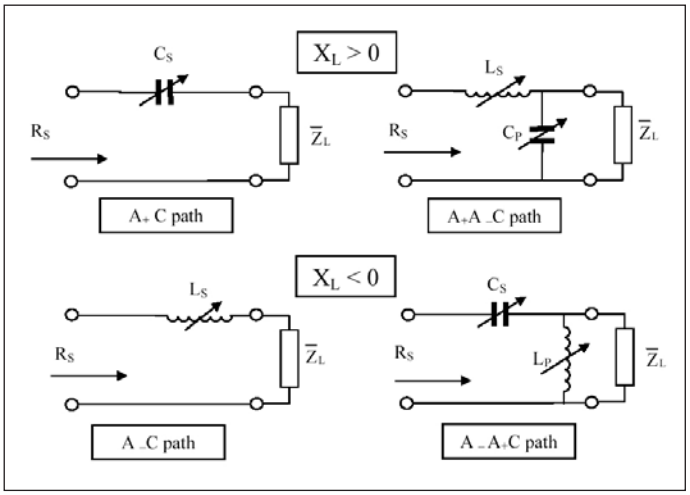
6.2.4 Cas particuliers

Un premier cas particulier correspond aux impédances pour lesquelles $R_L = R_S$ avec $X_L \neq 0$; ce sont donc les impédances représentées par tous les points de la droite R = RS (tels que les points B'_+ et B'_- de la **figure 29**) à l'exception du point C.

Un second cas particulier correspond aux impédances pour lesquelles $G_L = 1/R_S$ avec $X_L \neq 0$; ce sont les impédances représentées par tous les points du cercle $G = 1/R_S$ (tels que les points B_+ et B_- de la **figure 29**) à l'exception du point C.

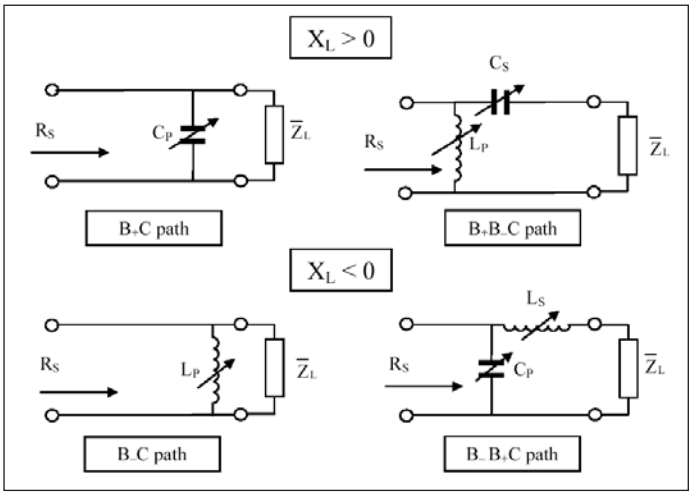
Nous détaillerons le cas particulier n° 1; le n° 2 s'expliquant de manière semblable. Considérons par exemple à la **figure 32** le point A_+ représentant une impédance $\overline{Z}_L$ pour laquelle $R_L = R_S$ et $X_L > 0$. On peut atteindre le point C directement en plaçant en série avec $\overline{Z}_L$ une capacité C_S; une autre façon d'atteindre le point C consiste à placer en parallèle avec $\overline{Z}_L$ une capacité C_P pour rejoindre le point A_- en suivant un arc de cercle, ensuite une inductance L_S en série avec le tout nous amène en C. Un raisonnement semblable s'applique au point A_- correspondant à une impédance pour laquelle $R_L = R_S$ et $X_L < 0$. Les schémas de coupleurs en L correspondants sont donnés à la **figure 33**; la **figure 34** donne ceux du cas particulier n° 2.

Figure 32: *les points A_+ et A_- correspondent au cas particulier n° 1; les points B_+ et B^- au cas particulier n° 2.*



Figuur 33: de L-koppelaars van het bijzonder geval n° 1.

Figure 33: schémas des coupleurs en L pour le cas particulier n° 1.



Figuur 34: de L-koppelaars van het bijzonder geval n° 2.

Figure 34: schémas des coupleurs en L pour le cas particulier n° 2.

7. Koppelaars met drie reactanties

Theoretisch zijn de L-koppelaars ongetwijfeld de meest interessante, zowel wat betreft de afregeling (er zijn slecht twee reactanties in te stellen) als wat betreft de verliezen. En toch… op de lage frequenties en afhankelijk van de aan te passen impedanties, kunnen de capaciteiten hoge waarden aannemen (meerdere nF). Er bestaan andere netwerken met drie reactanties die dit nadeel niet vertonen: de T- en PI-koppelaars. Dit wordt het onderwerp van het vierde deel van dit artikel.

Wordt vervolgd (een bibliografie zal verschijnen op het einde van het artikel).

ON5WF

a.liegeois@skynet.be

7. Coupleurs a trois réactances

Les coupleurs en L sont ***théoriquement***, les solutions les plus intéressantes tant du point de vue réglage (il n'y a que deux réactances à régler), que du point de vue des pertes. Cependant, dans les fréquences basses et en fonction des impédances à adapter, les capacités peuvent avoir des valeurs assez élevées (plusieurs nF). D'autres configurations utilisant 3 réactances ne présentent pas cet inconvénient; ce sont les coupleurs en T et en PI. L'étude de ces coupleurs à 3 réactances sera l'objet de la 4ème partie de cet article.

A suivre (la bibliographie sera donnée en fin d'article).

ON5WF

a.liegeois@skynet.be