كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : الكترونيات١

المحاضرة: الثالثة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

٦

2026

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

الدارات الكهربائية المترابطة

Coupling Electrical Circuits

إن الاهتمام المتزايد بأنظمة الاتصالات والتحكم وأنظمة نقل الإشارة دفع بنا لاستخدام طرائق جديدة لدراسة دارات كهربائية تمكننا من تحليل دارة المرشحات وغيرها، حيث يمكننا من حل شبكة ممانعات أو سماحيات ل عناصر الدارة الكهربائية وإيجاد قيم تيار الدخل والخرج للدارة المدروسة من خلال قوانين كيرشوف ومكافئ ثيفنن أو مكافئ نورتن.

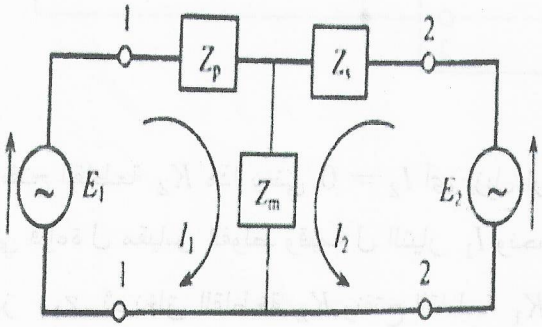
لتكن لدينا دارة الشكل (1) والمطلوب تحليل هذه الدارة.

سندرس في هذه المحاضرة:

1- تعيين المتحولات Z للشبكة المترابطة (إيجاد الممانعات للدارة المرتبطة).

2- تعيين المتحولات Y للشبكة المترابطة (إيجاد السماحية للدارة المرتبطة).

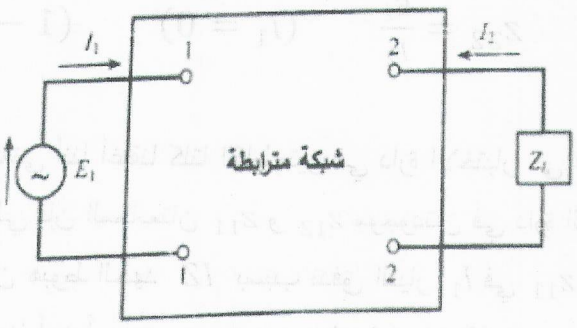
3- تعيين المتحولات الهجينة للشبكة المترابطة (إيجاد الممانعات والسماحية للدارة المرتبطة).



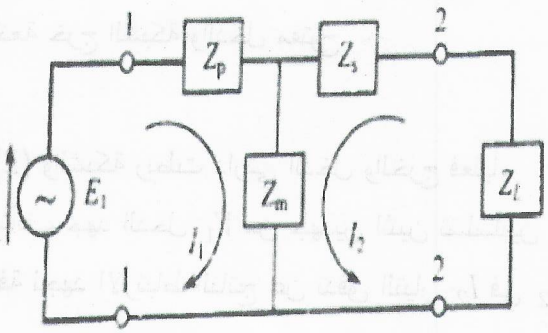
الشكل (1)

أولاً سنقوم باستبدال مصدر الجهد E_2 بممانعة حمل كما في الشكل (1b) فتتشكل دارة على شكل حرف T تربط مصدر الإشارة E_1 بممانعة الحمولة Z_L. في هذه الدارة نلاحظ أن التيار I_2 سيكون مقداراً سالباً مالم يتم تغيير اتجاهه ولذا سندرس في هذا النوع من الدارات تياري الدخل والخرج لشبكة الترابط العامة ذات الشكل (1c) وفق الاتجاهين المشار إليهما (الدخول والخروج للتيارات من الدارة). من المعلوم أن الشبكة (1c) تكافئ الشكل (1b) فيمكننا ذلك من إيجاد قيم التيارات بطرائق تقانات الممانعات التفرعية والتسلسلية المبسطة وأبسط هذه الطرائق تمثيل الشبكة المترابطة بشبكة مبسطة تأخذ شكل الحرف T حيث يتدفق التيار I_1 في عنصر واحد والتيار I_2 في العنصر الأخر.

لتعيين متحولات الشبكة المجهولة يجب أن نصلها بدارة اختبار من الشكل (2) ومقياسيي فولط يتميزان بمقاومة داخلية كبيرة كفاية في كل منهما.



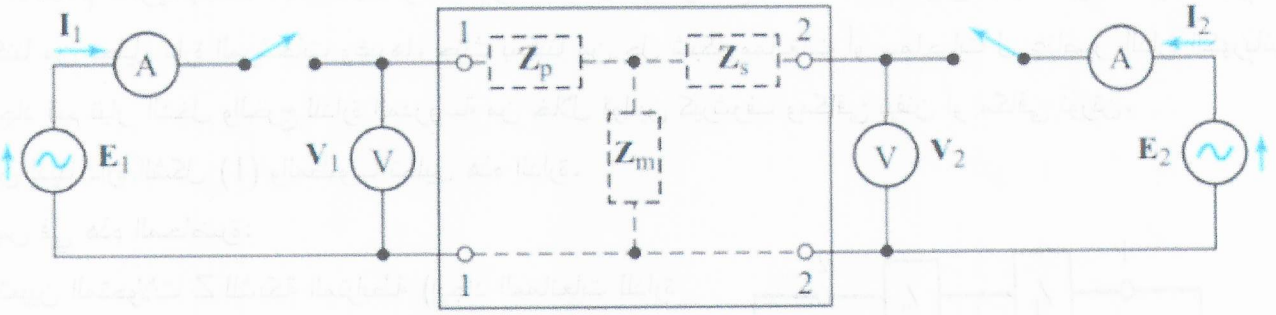
الشكل (1c)



الشكل (1b)

متحولات الممانعة لدارة مفتوحة:

لإيجاد تركيب شبكة رباعية القطب وثنائية المنفذ للدارة الموضحة في الشكل (1c) نحتاج إلى أربع متحولات ودارة اختبار كما في الشكل (2) تسمى هذه المتحولات بمتحولات الممانعة للدارة المفتوحة للشبكة.



الشكل (2)

نبدأ بفتح القاطعة K_2 هذا يعني $I_2 = 0$ أي يزيل ارتباط الدخل بأي مكون من مكونات الخرج ونغلق القاطعة K_1 يعطي قراءة ل مقياس الفولط وقيمة ل التيار I_1 ونحصل على النسبة $\frac{E_1}{I_1}$ وتمثل ممانعة دخل الدارة المفتوحة ونرمز لها بالرمز z_{11}. ثم نغلق القاطعة K_2 ونفتح القاطعة K_1 هذا يعني $I_1 = 0$ ولا يمكننا حساب ممانعة الدخل للشبكة لأنه لن يحصل هبوطاً للجهد بين طرفيها ومع ذلك لن تفاجأ بوجود قراءة لمقياس الفولط V_1 كجزء من التيار I_2 مرتبطة بدخل الشبكة وعندها نحصل على متحول جديد يعبر عن كمية ارتباط الخرج بالدخل من خلال تسجيل نسبة قراءة مقياس الفولط V_1 إلى قراءة مقياس الأمبير I_2 فنحصل على النسبة $\frac{V_1}{I_2}$ وهذه النسبة تمثل الجهد المتكون عند طرفي الدخل (1,1) والتيار المتدفق في طرفي الخرج (2,2) ويسمى هذا المتحول بممانعة التحويل العكسية لشبكة الارتباط المدروسة والدخل مفتوح ونرمز لها بالرمز z_{12} وبالتالي يمكننا كتابة المتحولات الخرج باتباع نفس الطريقة ونحصل على المتحولات الأربعة المطلوبة كما يلي:

$(1-1)$	$(I_2 = 0)$	$z_{11} = \frac{E_1}{I_1}$	ممانعة دخل الشبكة والخرج مفتوح
$(1-2)$	$(I_1 = 0)$	$z_{12} = \frac{V_1}{I_2}$	ممانعة التحويل العكسية والدخل مفتوح
$(1-3)$	$(I_2 = 0)$	$z_{21} = \frac{V_2}{I_1}$	ممانعة التحويل المباشر والخرج مفتوح
$(1-4)$	$(I_1 = 0)$	$z_{22} = \frac{E_2}{I_2}$	ممانعة خرج الشبكة والدخل مفتوح

هذا يعني أننا أغلقنا كلتا القاطعتين في دارة الاختبار في الشكل (2) والشبكة ربطت دارتي الدخل والخرج فعلياً، وبالتالي فإن الممانعتان z_{11} و z_{12} موجودتان في دارة الدخل ويتألف جهد الدخل V_1 من جهدين اثنين تسلسليين يمثلان هبوط الجهد IZ بسبب تدفق التيار I_1 في z_{11} بالإضافة لجهد الارتباط الناتج عن تدفق التيار I_2 في z_{12} و لدينا أيضاً z_{21} و z_{22} موجودتان في دارة الخرج.

تعيين الدارة المكافئة للشبكة المترابطة المدروسة:

نطبق قانون كيرشوف للجهد على الشبكة المدروسة.

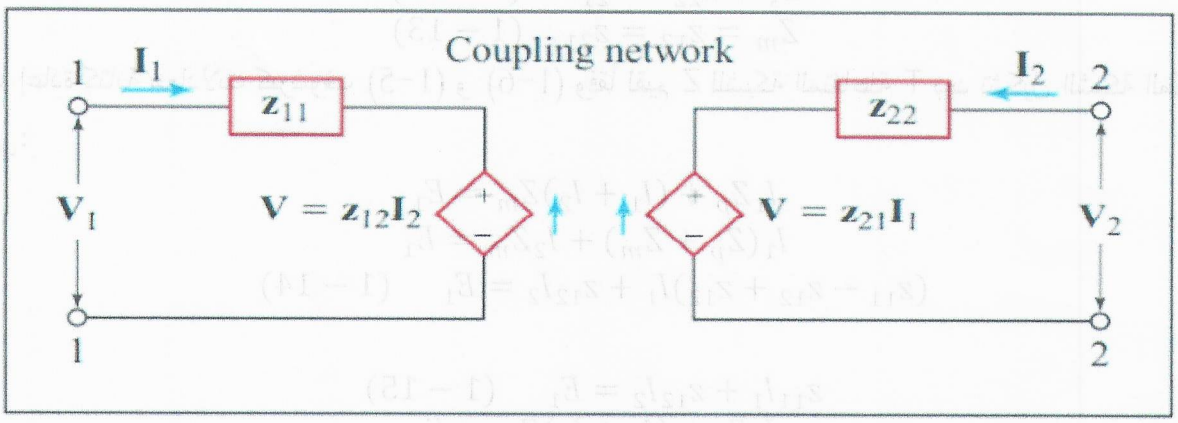
بتطبيق قانون كيرشوف للجهد على طرفي دارة الدخل للشبكة نحصل على المعادلة (5-1):

$$z_{11}I_1 + z_{12}I_2 = E_1 \qquad (1-5)$$

وأيضاً من أجل خرج الشبكة نحصل على معادلة كيرشوف للجهد الممثلة بالمعادلة (6-1):

$$z_{21}I_1 + z_{22}I_2 = E_2 \qquad (1-6)$$

بعد كتابة معادلة كيرشوف للجهد الدخل وخرج شبكة الارتباط سنعين الدارة المكافئة لهذه الشبكة والممثلة بالمعادلتين (5-1) و(6-1) ومن أجل ذلك نستخدم الصندوق الموافق وندرس الجهدين الظاهرين في مربطي دخل الشبكة المترابطة ومن الواضح أن مجموع الجهدين يمثل دارة تسلسلية حيث لاحظنا في الشكل (2) أنه عند إغلاق القاطعة K_1 وفتح القاطعة K_2 ظهرت قراءة مقياس الفولط V_1 بسبب تيار الخرج I_2 ولذلك يمكننا ان نؤكد على أن ما نراه هو منبع جهد مكافئ ل ثيفنن مرتبط بالتيار المار في جزء ما أخر من الدارة وجهد الدارة المفتوحة لمنبع الجهد هذا المتحكم به بالتيار هو $z_{12}I_2$ وتمثل z_{11} الممانعة الداخلية للمنبع المرتبط، وأيضاً بالنظر إلى طرفي الخرج نرى مكافئ ثيفنن مشابه مرتبط بمنبع الجهد $z_{21}I_1$ ويمثل الشكل (3) الدارة المكافئة من أجل متحولات ممانعة الدارة المفتوحة لشبكة ارتباط رباعية الأقطاب (ثنائية المنفذ).



الشكل (3)

إيجاد متحولات شبكة الترابط بدلالة الممانعات للدارة المفتوحة للشبكة المدروسة:

نجري نفس القياسات على ورقة بشبكة T منقطة باتباع نفس الخطوات ومنه نجد عند إغلاق القاطعة K_1 وفتح القاطعة K_2 أن قيمة التيار I_1 يعبر عنها بالمعادلة (7-1):

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_p + Z_m} \qquad (1-7)$$

ومنه

$$Z_p + Z_m = \frac{E_1}{I_1} \equiv Z_{11} \qquad (1-7)$$

وأيضاً لدينا قراءة لمقياس الفولط V_2 :

$$V_2 = Z_m I_1$$

ومنه نحصل على المعادلة (8-1):

$$Z_m = \frac{V_2}{I_1} \equiv Z_{21} \qquad (1-8)$$

وبشكل مشابه نجد عند إغلاق القاطعة K_2 وفتح القاطعة K_1 أن قيمة التيار I_2 يعبر عنها بالمعادلة (1-9):

$$I_2 = \frac{E_1}{Z_s + Z_m} \qquad (1-9)$$

ومنه

$$Z_s + Z_m = \frac{E_2}{I_2} \equiv z_{22} \qquad (1-9)$$

وأيضاً لدينا قراءة لمقياس الفولط V_1 :

$$V_1 = Z_m I_2$$

ومنه نحصل على المعادلة (1-10):

$$Z_m = \frac{V_1}{I_2} \equiv z_{12} \qquad (1-10)$$

ومن مجموعة المعادلات الأخيرة نحصل على المتحولات Z للشبكة بشكلها النهائي:

$$Z_p = z_{11} - z_{12} \qquad (1-11)$$
$$Z_s = z_{22} - z_{21} \qquad (1-12)$$
$$Z_m = z_{12} = z_{21} \qquad (1-13)$$

ويمكننا إعادة كتابة معادلات كيرشوف (1-5) و (1-6) وفقاً لقيم Z للشبكة المتفاعلة T بعد تشكيل الشبكة المكافئة كما يلي:

$$I_1 Z_p + (I_1 + I_2) Z_m = E_1$$
$$I_1 (Z_p + Z_m) + I_2 Z_m = E_1$$
$$(z_{11} - z_{12} + z_{12}) I_1 + z_{12} I_2 = E_1 \qquad (1-14)$$

ومنه

$$z_{11} I_1 + z_{12} I_2 = E_1 \qquad (1-15)$$
$$I_2 Z_s + (I_1 + I_2) Z_m = E_2$$
$$I_2 (Z_s + Z_m) + I_1 Z_m = E_2$$
$$(z_{22} - z_{21} + z_{21}) I_2 + z_{21} I_1 = E_2 \qquad (1-16)$$
$$z_{22} I_2 + z_{21} I_1 = E_2 \qquad (1-16)$$

نلاحظ أن المعادلتين (1-15) و (1-16) تمثلان المعادلتين (1-5) و (1-6).

لاستخدام الشبكة T لاحظ أن ممانعتي التحويل المباشرة والعكسية يجب أن تكونان متطابقتين وهذا مايميز أي شبكة غير فعالة مؤلفة من مقاومة وعناصر ردية فقط وعليه نسمي Z_m بالممانعة التبادلية للشبكة المترابطة. وفي الشبكات الفعالة المؤلفة من ترانزستورات يجب ان يختلف المتحولان z_{21} و z_{12} كي تجري عملية التضخيم له.

تعيين المقاومة الداخلية الكلية Z_{in} للشبكة المترابطة T:

بفرض كان لدينا الشبكة المترابطة T كما في الشكل (1c) ولدينا مقاومة حمل Z_L بدل المنبع عنده تكتب معادلتي كيرشوف للجهد للدارة المترابطة كما يلي:

$$z_{11} I_1 + z_{12} I_2 = E_1 \qquad (1-15)$$

تبقى بدون تغيير

أما المعادلة (1-16) تتغير وتصبح من الشكل (1-17):

$$I_2 (Z_L + Z_s + Z_m) + I_1 Z_m = E_2 \qquad (1-17)$$

$$(z_{22}+Z_L)I_2+z_{21}I_1=E_2 \quad (1-18)$$

من (1-18) نجد:

$$I_2=\frac{-z_{21}I_1}{z_{22}+Z_L} \quad (1-19)$$

بالتعويض في (1-15):

$$z_{11}I_1-z_{12}\frac{z_{21}I_1}{z_{22}+Z_L}=E_1 \quad (1-20)$$

بالترتيب نجد ممانعة الدخل الكلية وفق العلاقة (1-21):

$$z_{11}-z_{12}\frac{z_{21}}{z_{22}+Z_L}=\frac{E_1}{I_1}=Z_{in} \quad (1-21)$$

$$z_{12}z_{21}=Z_m^2$$

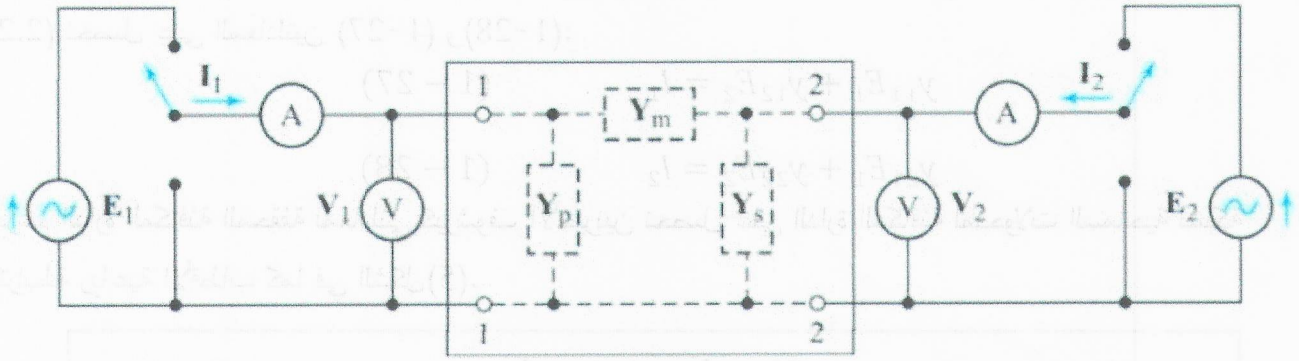
وبالتالي:

$$Z_{in}=z_{11}-\frac{Z_m^2}{z_{22}+Z_L}=z_{11}-Z_C \quad (1-22)$$

تسمى هذه المعادلة بممانعة الدخل الكلية وتعبر عن دارة مكافئة مؤلفة من ممانعتين موصولتين على التسلسل ويسمى الحد $\frac{Z_m^2}{z_{22}+Z_L}$ بممانعة الترابط ويرمز لها ب Z_C ويعد متحولاً هاماً في تقانات الدارة المترابطة وتدل الإشارة السالبة أن ممانعة التبادل تسعى لتخفيض ممانعة الدخل للشبكة المدروسة.

متحولات السماحية للدارات المقصورة:

يبين الشكل (4) دارة اختبار فيها رباعي اقطاب على شكل الحرف π لدراسة متحولات السماحية للدارة المقصورة المدروسة.



الشكل (4)

من أجل التأكد من أن المنبع E_2 لا يتدخل مع قراءات مقاييس الدخل عندما نقيس سماحية الدخل نضع القاطعة في مكان يقصر عنده قطبا الخرج (2,2) عبر المقياس I_2 وبشكل مشابه عندما نطبق E_2 على قطبي الخرج يجب أن نقصر القاطعة الأولى قطبي الدخل (1,1) عبر المقياس I_1.

نبدأ بالجهد E_1 المطبق على قطبي الدخل ونسجل قراءات المقياسين ونحصل على النسبة $\frac{I}{V}$ والتي تمثل سماحية الدخل للدارة والخرج دارة مقصورة ويرمز لها بالرمز y_{11} ، ومرة أخرى لن نتفاجئ بقراءة مقياس أمبير I_2 في دارة قصر قطبي الخرج كجزء من تيار الدخل المترابط مع الخرج.

بإمعان النظر بقطبي الخرج المقصورين نرى منبع نورتون المكافئ المؤلف من مصدر تيار مستقل يتم التحكم به بالجهد المطبق بين قطبي الدخل.

لإيجاد الثابت الذي يربط I_2 ب E_1 نقسم قراءة مقياس الأمبير I_2 على قراءة مقياس الفولط V_1 ويمثل سماحية التحويل المباشر للشبكة ويرمز لها ب y_{21}.

وللحصول على المتحولين الأخرين المرتبطين بدارة الخرج نعكس موضعي القاطعتين فنحص على سماحية الخرج y_{22} للدارة المدروسة والدخل دارة قصر $E_1 = 0$ وأيضاً سماحية التحويل العكسي الناتجة من قراءة I_1 بالرغم من أن الدخل مقصور ويرمز لها ب y_{12}.

نحصل على متحولات السماحية لأي شبكة ثنائية المنفذ وفق المعادلات:

سماحية دخل دارة القصر $$y_{11} = \frac{I_1}{E_1} \qquad (E_2 = 0) \qquad (1-23)$$

سماحية التحويل العكسي $$y_{12} = \frac{I_1}{E_2} \qquad (E_1 = 0) \qquad (1-24)$$

سماحية التحويل المباشر $$y_{21} = \frac{I_2}{E_1} \qquad (E_2 = 0) \qquad (1-25)$$

سماحية خرج دارة القصر $$y_{22} = \frac{I_2}{E_2} \qquad (E_1 = 0) \qquad (1-26)$$

وبما أن مصدر تيار نورتن المكافئ يجب أن يكون على التفرع مع سماحية الدخل حيث نلاحظ من الدارة وجود مسارين لتدفق لتيار عند دخوله للشبكة.

الدارة المكافئة للشبكة المترابطة المدروسة:

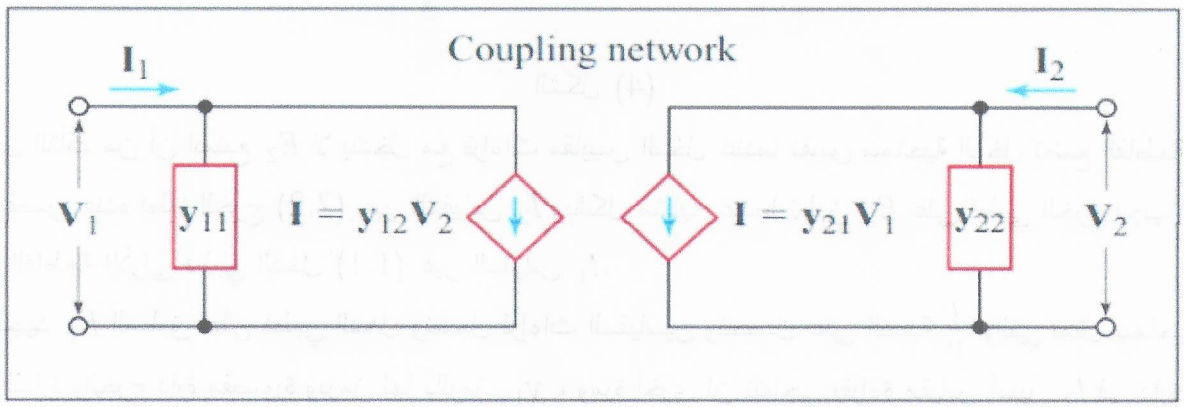
لإيجاد الدارة المكافئة للدارة المدروسة لابد من تطبيق قانون كيرشوف للتيار على دخل وخرج الدارة.

بكتابة معادلات كيرشوف للتيار I_1 الداخل إلى قطبي الدخل (1,1) للدارة، وتيار الخرج I_2 من أجل قطبي الخرج (2,2) نحصل على المعادلتين (1-27) و(1-28):

$$y_{11}E_1 + y_{12}E_2 = I_1 \qquad (1-27)$$

$$y_{21}E_1 + y_{22}E_2 = I_2 \qquad (1-28)$$

وبرسم الدارة المكافئة المحققة لمعادلتي كيرشوف الأخيرتين نحصل على الدارة المكافئة لمتحولات السماحية لشبكة مترابطة رباعية الأقطاب كما في الشكل(5).



الشكل (5)

إيجاد متحولات شبكة الترابط بدلالة السماحية للدارة المقصورة للشبكة المدروسة:

إذا افترضنا الآن أن الشبكة المترابطة مؤلفة من الشبكة المرسومة بالخطوط المنقطة

نبدأ بمقياس أمبير I_2 الذي يرتب دارة مقصورة عبر قطبي الخرج حيث يمكننا عندها كتابة المعادلة الأتية:

$$I_1 = E_1(Y_p + Y_m)$$

ومنه

$$Y_p + Y_m = \frac{I_1}{E_1} = y_{11} \qquad (1-29)$$

وبشكل مشابه نجد:

$$Y_s + Y_m = \frac{I_2}{E_2} = y_{22} \qquad (1-30)$$

بجعل القاطعة الأولى في وضع الدارة المقصورة يمكن أن لا يهبط جهد بين طرفي السماحية Y_p وبالتالي لا يتدفق تيار عبرها فكامل التيار الجاري في السماحية Y_m يجب أن يتدفق في مقياس أمبير I_1 وبالنتيجة سوف يأخذ التيار I_1 نفس القيمة التي يأخذها التيار الجاري في Y_m ولكن التيار الجاري فيها ناتج من الخرج E_2 وبالتالي يأخذ اتجاهاً معاكساً لاتجاه التيار I_1 ومنه:

$$I_1 = -I_{Y_m} = -Y_m E_2$$

$$Y_m = -\frac{I_1}{E_2} = -y_{12} \qquad (1-31)$$

$$Y_m = -\frac{I_2}{E_1} = -y_{21} \qquad (1-32)$$

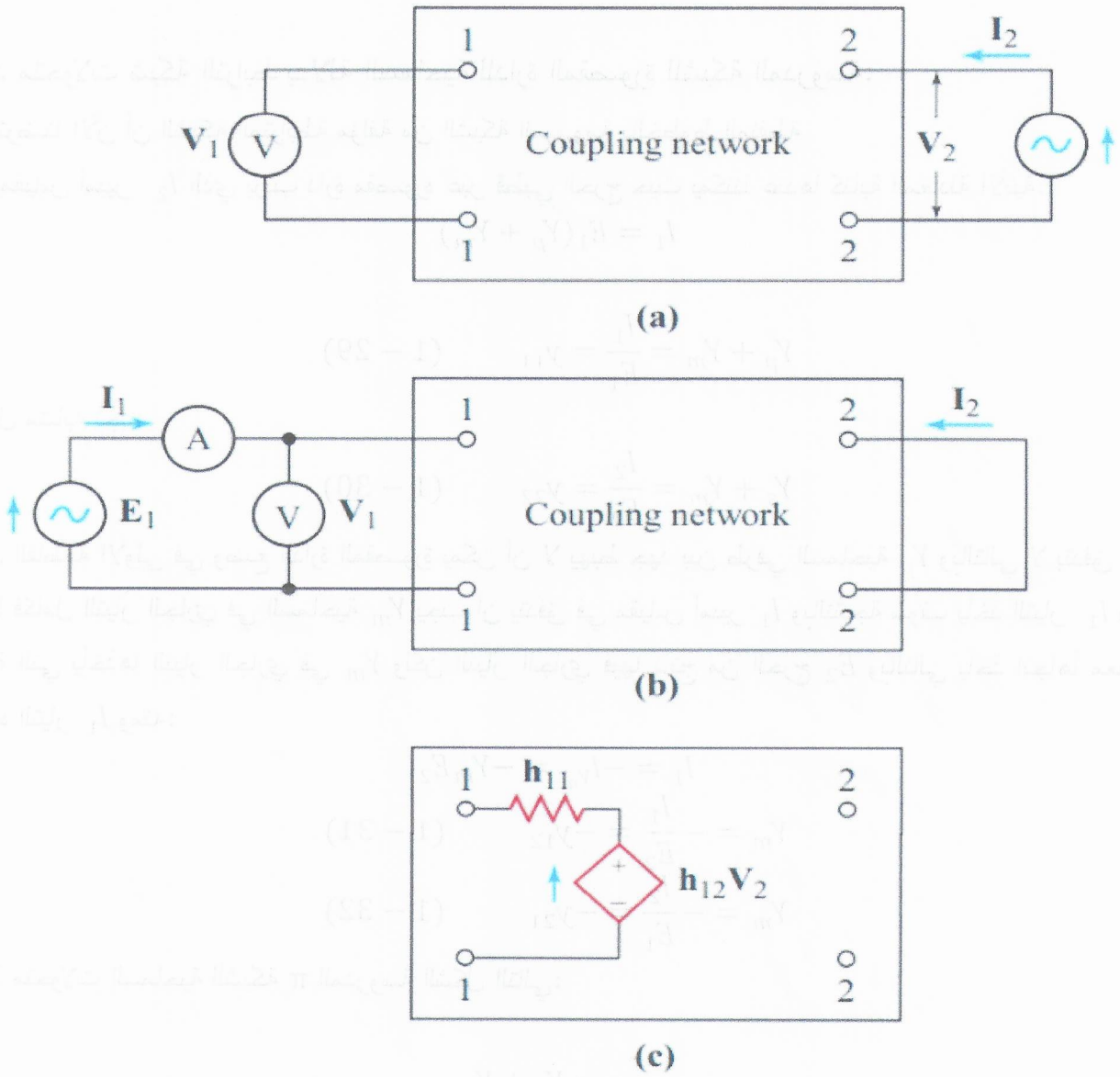
وتأخذ متحولات السماحية للشبكة π المدروسة الشكل التالي:

$$y_{11} = Y_p + Y_m$$
$$y_{22} = Y_s + Y_m$$
$$-Y_m = y_{12} = y_{21}$$
$$Y_p = y_{11} + y_{12}$$
$$Y_s = y_{22} + y_{21}$$

المتحولات الهجينة:

هي مجموعة مختلطة من متحولات الممانعة ومتحولات السماحية وتستخدم بشكل كبير في تحليل الدارات الحاوية على أجهزة كهربائية فعالة كالترانزستورات باعتبار طرفي الدخل لشبكة ارتباط رباعية القطب كمنبع جهد مكافئ لثيفنن وطرفي الخرج كمنبع تيار مكافئ لنورتن.

اعتماداً على ذلك نحتاج لتعيين المتحولات الأربعة الأساسية للشبكة الترابط المدروسة في الشكل (6) لذا سنعتمد نفس الطريقة في الفقرتين السابقتين بالاعتماد على شبكة اختبار.



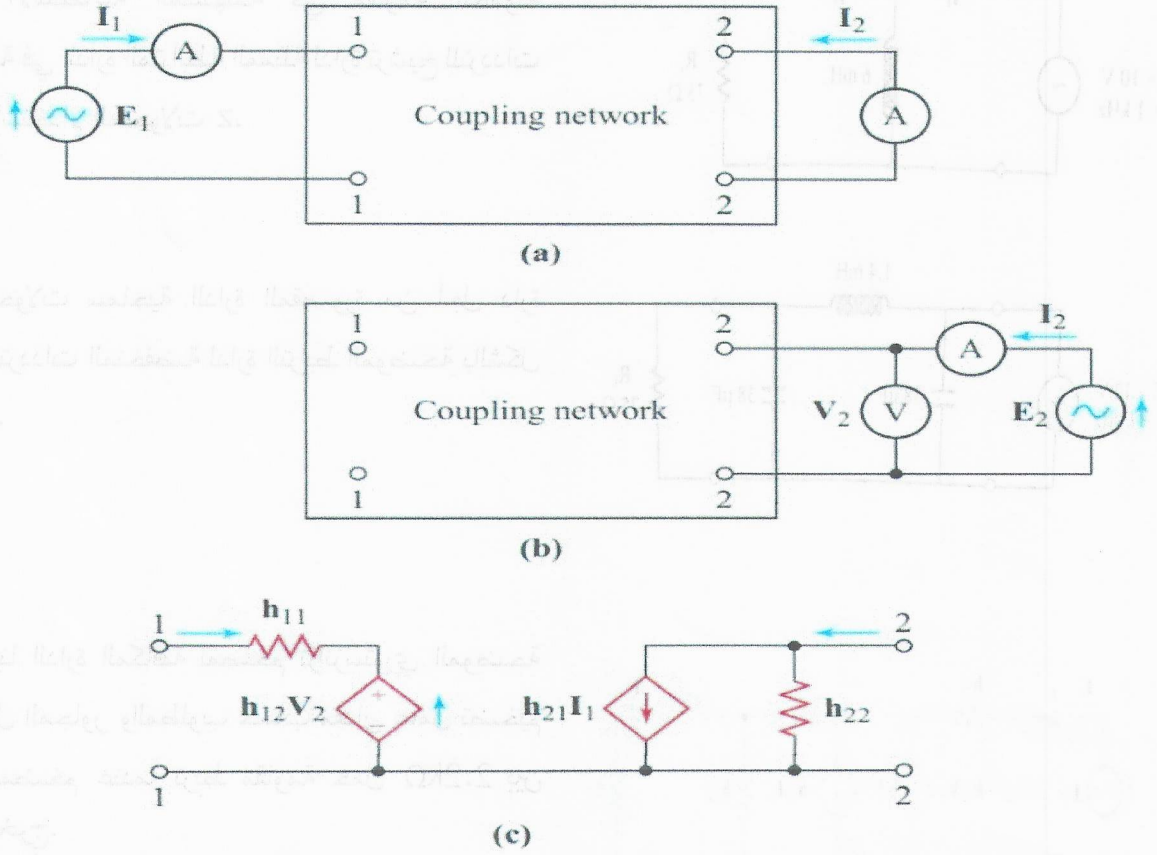
الشكل (6)

لإيجاد جهد الدارة المفتوحة لمنبع ثيفنن المكافئ عند طرفي الدخل (1,1) للدارة الشكل (6a) نغذي طرفي الخرج بالجهد V_2 وعندها ندرس مكافئ ثيفنن على أنه منبع جهد محكم بجهد من جزء أخر من الدارة وبالتالي فإن المتحول الذي يمثل جزءاً من الخرج ويظهر عند طرفي الدخل هو متحول نسبة الجهد العكسي والمعبر عنها بالنسبة $\frac{V_1}{V_2}$ ويرمز له ب المتحول h_{12} ولتعيين المتحول الأخر المرتبط بالدخل نقصر دارة الخرج ($V_2 = 0$) ومنه نحصل على النسبة بين جهد الدخل V_1 وتيار الدخل I_1 وتمثل متحول ممانعة الدخل والخرج مقصور شكل (6b)، وبالتالي حصلنا على مكافئ ثيفنن عند الدخل لدارة الارتباط المدروسة والمكون من منبع جهد $h_{12}V_2$ مرتبط مع ممانعة تسلسلية h_{11}.(شكل 6c)

لتعيين المكافئ للخرج أي تعيين تيار الدارة المقصورة لمنبع نورتن المكافئ عند طرفي الخرج (2,2) نقوم بتغذية طرفي الدخل بالتيار I_1 ونقصر طرفي الخرج بمقياس أمبير I_2 ومنه سيكون التيار I_2 جزءاً ثابتاً من تيار الدخل I_1 ونحصل على المتحول المرتبط بنسبة التيار المباشر h_{21}.(شكل 7a)

من المعلوم أن مكافئ نورتن يوصل على التفرع مع ممانعة الخرج فمن الملائم التعبير عنها بسماحية الخرج وبالتالي لتحديدها نبقي طرفي دخل الشبكة دارة مفتوحة الشكل (7b) وذلك بغية التخلص من I_1 أثناء قياس I_2 وV_2 ونحصل

على المتحول الأخير سـماحية الخرج ودخل الدارة مفتوح ويرمز له ب h_{22}. ومنه حصـلنا على مكافئ نورتن المثل ب $h_{21}I_1$ المرتبط تفرعياً مع السماحية h_{22} الشكل (الجزء الأيسر المطبق على الخرج 7c).



الشكل (7)

إذن يمكننا التعبير عن القياسات الأربعة المختبرة للمتحولات الهجينة لشبكة رباعية الأقطاب مترابطة وفق المعادلات التالية:

سماحية الدخل والخرج حالة قصر $h_{11} = \frac{V_1}{I_1}$ $(V_2 = 0)$ $(1-33)$

نسبة الجهد العكسي $h_{12} = \frac{V_1}{V_2}$ $(I_1 = 0)$ $(1-34)$

نسبة التيار المباشر $h_{21} = \frac{I_2}{I_1}$ $(V_2 = 0)$ $(1-35)$

سماحية الخرج والدخل مفتوح $h_{22} = \frac{I_2}{V_2}$ $(I_1 = 0)$ $(1-36)$

الدارة المكافئة للشبكة الهجينة المدروسة:

نطبق قانون كيرشوف للجهد على طرفي دخل الدارة من أجل مكافئ ثيفنن، وقانون كيرشوف للتيار على طرفي خرج الدارة من أجل منبع نورتن المكافئ، بالتطبيق نحصل على المعادلتين (1-37) و(1-38):

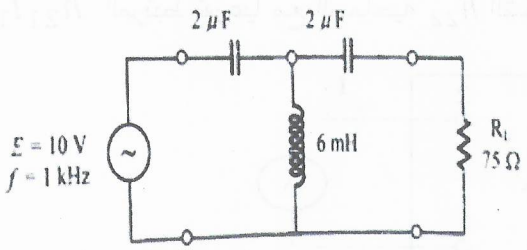
$$h_{11}I_1 + h_{12}V_2 = E_1 \qquad (1-37)$$

$$h_{21}I_1 + h_{22}V_2 = I_2 \qquad (1-38)$$

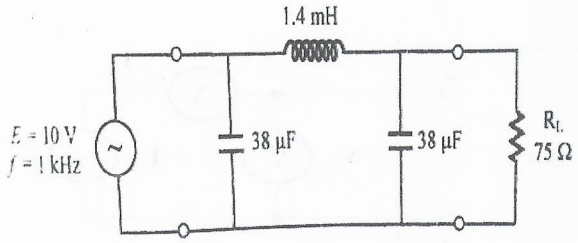
يمثل الشكل (7c) الدارة المكافئة لدارة خرج شبكة رباعية الأقطاب ممثلة للمتحولات الهجينة.

تطبيقات:

لتكن لدينا الدارة الموضحة في الشكل الجانبي والمطلوب: احسب الاستطاعة المستهلكة في مقاومة الحمولة الموصولة في الدارة المترابطة الممثلة لدارة ترشيح للترددات العالية باستخدام المتحولات z.

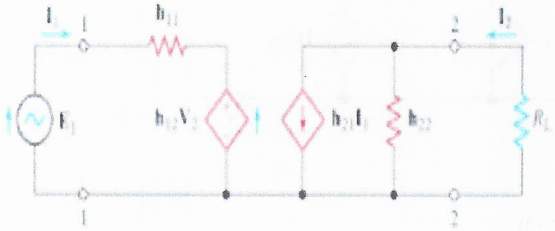


عين متحولات سماحية الدارة المقصورة من أجل دارة ترشيح الترددات المنخفضة لدارة الترابط الموضحة بالشكل المجاور.



لتكن لدينا الدارة المكافئة لمضخم ترانزستوري الموضحة في الشكل المجاور والمطلوب حساب مقدار عامل تضخيم الجهد للمضخم عندما تربط مقاومة حمل 2.2kΩ بين طرفي الخرج.

إذا علمت أن معطيات الدارة $h_{11} = 50\Omega$ و $h_{12} = 3 * 10^{4}$ و $h_{21} = -0.95$ و $h_{22} = 2 * 10^{-5}s$



مكتبة A to Z