ملف المتحرِّض في آلات التيار المستمر

Armature Winding in D.C Machines

٤-١- مقدمـــة: Introduction

يتألف ملف المتحرّض من وشائع توضع نواقلهـــا (أســـلاكها) فـــي مجـــارٍ خاصـــة على السطح الخارجي للمتحرّض، وتوصل وشائع ملف المتحرِّض مع بعضها بوساطة صفائح المجمّع.

يؤدي ملف المتحرّض دوراً أساسياً في تحديد مواصفات الآلة وكلفتها، لـــذا يجـــب أن يلبي الشروط الآتيـــة:

- أن يكون ذو متانة ميكانيكية وكهربائية ليخدم مدة طويلة تتراوح بين (20 – 15) سنة.
- أن يكون مصمماً حسب معطيات الجهـــد وتيـــار الحمولة وسرعة الـــدوران الموافقـــة للاستطاعة الاسمية للآلة.

- أن يؤمن الشروط المُرضية لسحب التيار من المجمّع من دون حدوث شرارة كهربائية بين صفائحه.

- أن تكون تقنية (تكنولوجيا) اللف بسيطة قدر الإمكان.

للإقلال من التذبذب في شكل القوة المحرّكة الكهربائية المتحرّضة، يُلف ملف المتحرّض بعدد كبير من الوشائع، إلا أنه لا يمكن تجهيز المتحرّض بعدد كبير من المجاري لأن ذلك سيؤدي إلى:

- أن تكون المجاري ضيقة وتشغل عازلية النواقل الوشائع وعازلية المجرى قسماً كبيراً من المجرى ولن يبقى سوى مكان صغير للنواقل.

- عدم متانة الأسنان بسبب تضيق عرضها، وبالتالي الإسراع في حدوث التشبع وزيادة التسرب المغناطيسي.

وهذا سيؤدي إلى عدم استغلال المواد الفعّالة وخسارة في استطاعة الآلة إضافة إلى زيادة في المواد العازلة وغلاء ثمن الآلة ككل.

٤-٢- تصنيف اللف: Windings Classification

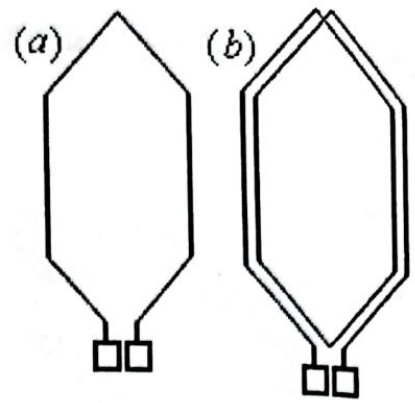
يُمكن تصنيف اللف في ثلاثة أنواع رئيسة هي:

١- اللف الانطباقي (التطابقي) Lap Winding، ويسمى باللف التفرعي أيضاً، ويقسم إلى: لف بسيط، ولف مركّب.

٢- اللف التموجي (التطابقي) Wave Winding، ويسمى باللف التسلسلي، ويقسم إلى: لف بسيط، ولف مركّب.

٣- اللف الخاص (المختلط).

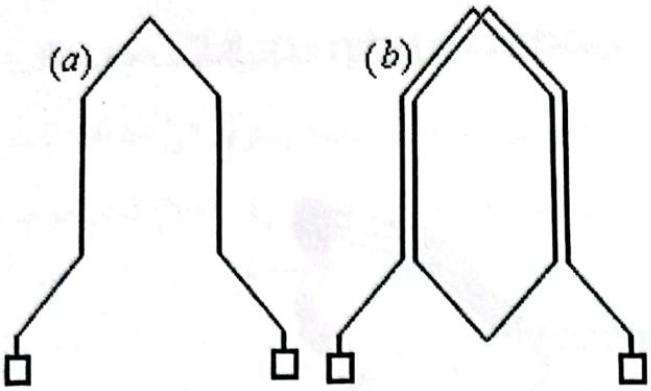
تُعد الوشيعة الوحدة الأساسية في الملف، توصل نهايتيها مع صفيحتين من صفائح المجمّع. تتألف الوشيعة الواحدة من لفة واحدة أو عدد من اللفات المتجاورة تسلسلياً، كما هو مبين في الشكلين (٤-١)، و(٤-٢).



الشكل (٤-١): لف انطباقي

a- وشيعة مؤلفة من لفة واحدة

b- وشيعة مؤلفة من لفتين

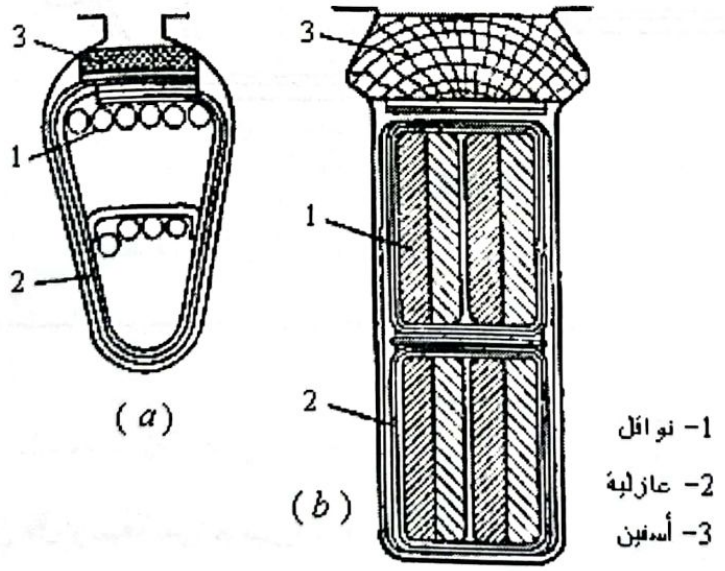


الشكل (٤-٢): لف تموجي

a- وشيعة مؤلفة من لفة واحدة

b- وشيعة مؤلفة من لفتين

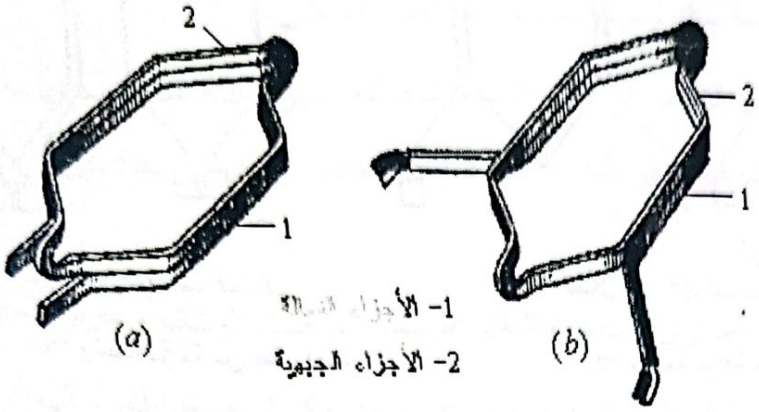
تشكل الوشائع في آلات التيار المستمر ذات الاستطاعة الصغيرة من نواقل دائرية المقطع معزولة، ويأخذ المجرى شكلاً بيضوياً نصف مغلق يتناقص عرضه باتجاه المركز، الشكل (٤-٣- a). أما في حالة استخدام نواقل مستطيلة المقطع فيأخذ المجرى شكلاً مستطيل الشكل مفتوح، الشكل (٤-٣-b) ، وتستخدم هذه المجاري في الآلات كبيرة الاستطاعة.



الشكل (٤-٣): مجاري آلة لتيار المستمر

a- مجرى بيضوي b- مجرى مستطيل

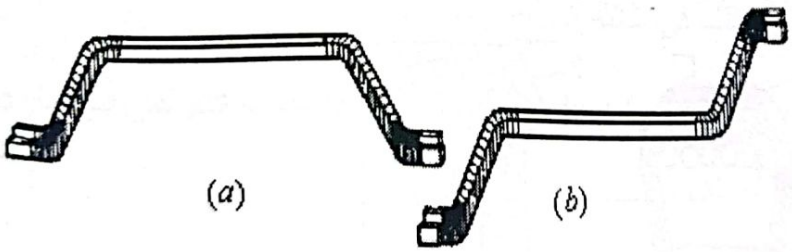
يبين الشكل (٤-٤) أشكال وشائع المتحرّض في حالة اللف الانطباقي واللف التموجي



الشكل (٤-٤): وشائع المتحرّض

a- عند اللف الانطباقي b- عند اللف التموجي

تكون وشيعة اللف في الآلات ذوات الاستطاعات الكبيرة مصنّعة من قضيبين من النحاس مستطيلي المقطع يتم تصنيعهما بشكل كامل أو كل نصف على حدى، ثم يلحم النصفان من الخلف مع بعضهما، ومن الأمام يُلحم النصفان على صفائح المجمِّع، الشكل (٤-٥).

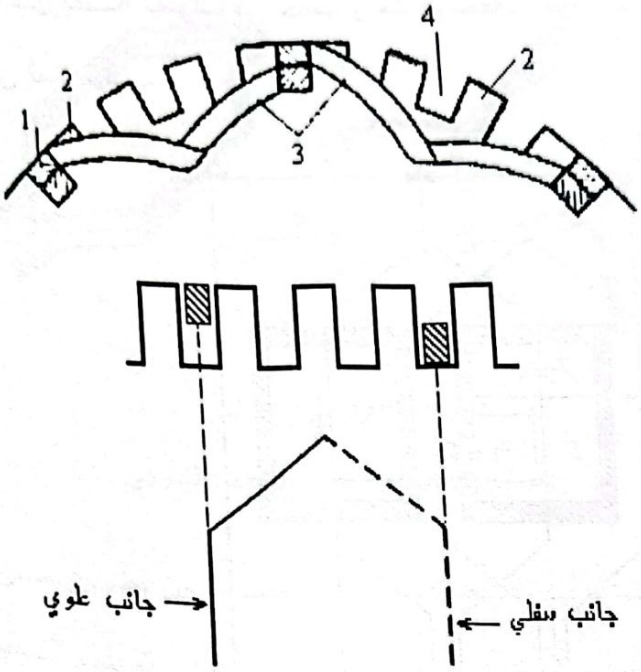


الشكل (٤-٥): نصف وشيعة

a- لف انطباقي b- لف تموجي

تتكون كل وشيعة من جانبين أو طرفين فعالين متوضعين في مجريين مختلفين، البعد بينهما هو عرض الوشيعة y_1، ويسمى بخطوة اللف الأولى أيضاً، يجب على هذه الخطوة أن تساوي أو تقارب طول الخطوة القطبية τ وذلك حتى تتجمع القوى المحرّكة المتحرّضة

وشيعة. نرسم عادة جوانب الوشائع المتوضعة في الطبقات العليا بخطوط مستمرة، أما جوانب الوشائع المتوضعة في الطبقات السفلى بخطوط متقطعة.



1- الجوانب الفعالة
2- الأوتاد
3- الأقسام الجبهية
4- المجاري

الشكل (٤-٧): طريقـــة توزع جوانب الوشائع في المجاري

يتميز ملف المتحرِّض بالمقادير الآتيـــة:

S: عـــدد الوشائع الكلية.

Z: عـــدد المجاري الحقيقية.

W_c: عـــدد لفات الوشيعة الواحدة.

$u = S_n$: عدد أزواج الطبقات أو عدد الوشائع المتوضعة في مجرى واحد.

K: عـــدد صفائح أو قطع المجمِّع.

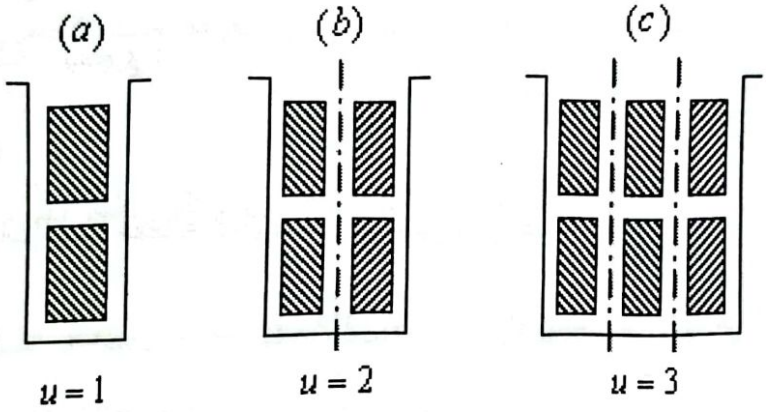
N: عـــدد النواقـــل الفعّالة.

N_z: عـــدد النواقل الفعالة في مجرى واحد.

Z_e: عـــدد المجاري الأولية أو الوهمية.

بما أن اللف ثنائي الطبقة، فإنه يوجد في مجرى واحـد جـانبي وشـيعتين مختلفتـين إحداهما فوق الأخرى، بحيث إذا كان أحد جوانب وشيعة موجود في الطبقة العليا من الملـف في المجرى (الطبقة القريبة من الثغرة الهوائية)، فإن الجانب الآخر موجود في الطبقة السفلى، ولهـذا يُمكن تقسيم الملف إلى:

- **لف ذو طبقتين:** يكون هناك جانبان فقط من جوانب الوشائع وعدد أزواج الطبقات $u = 1$.
- **لف متعـدد الطبقات:** يكون في المجرى الواحد أربعة جوانب للوشائع أو أكثر، أي أن عدد أزواج الطبقات $u = 2,3,4,...$، الشكل (٤-٨).



الشكل (٤-٨): اللف ثنائي الطبقة و اللف متعدد الطبقات

a- اللف ثنائي الطبقـة

c-b - اللف متعدد الطبقات

يسمى الحيّز الذي تشغله طبقتان في المجرى بالمجرى الجزئي Elementary Slots، ونرمز إلى عدد المجاري الجزئية في المجرى الواحد Z_e، وهذا العدد يـساوي عـدد أزواج الطبقات u. أي عدد المجاري الوهمية يساوي:

$$Z_e = u\,Z = S_n.Z \qquad (٤-١)$$

حيث S_n : عدد الوشائع المتوضعة في مجرى واحد.

ويساوي عدد وشائع ملف المتحرّض الآتي:

$$S = \frac{N}{2\,W_c} \qquad (٤-٢)$$

حيث N: عـــدد النواقـــل الكلية الموجودة في مجاري المتحرّض.

بما أن كل وشيعة تتصل مع صفيحتين من صفائح المجمّع، بالتالي فإن عـــدد صـــفائح المجمّع في الملف ثنائي الطبقة يساوي $K = S$.

إذا وضع في كل مجرى جانبان لوشيعتين مختلفتين أحدهما في الطبقة العلوية والآخـــر في الطبقة السفلية، عند هـــذا فإن عـــدد مجاري المتحرّض هو:

$$Z = S = K \qquad (٤-٣)$$

أما إذا توضع في كل مجرى عـــدد محـــدد من جوانب الوشائع بشكل متجـــاور، أي $u > 1$ فإن عـــدد الوشائع يساوي:

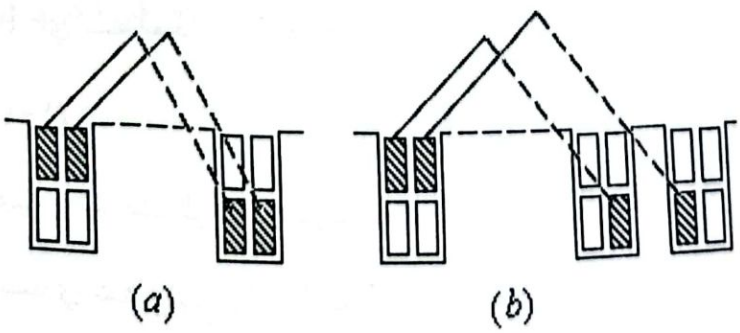
$$S = K = u\,Z = S_n . Z \qquad (٤-٤)$$

ويكون عـــدد النواقـــل الفعّالة المتوضعة في مجرى واحد:

$$N_n = \frac{N}{Z} = \frac{S.2\,W_C}{Z} = 2\,W_C . S_n = 2\,W_C . u \qquad (٤-٥)$$

وعند $S_n = u > 1$ (أي يحتوي المجرى الواحد على أكثر من طبقتين)، نميز نـــوعين من اللف (أو الملف الكلي الحاصل):

- لف متشابه الوشائع، أي تمتلك الوشائع عرض واحد (حيث تقـــــع الجوانـــب الثانيـــة للوشائع في مجرى واحد، الشكل (٤-٩ – a) .



الشكل (٤-٩): أنواع اللف متعدد الطبقات

a- لف متشابه الوشائع b- لف متدرج

- لف متـــدرج الوشائع، أي أن الجوانب الأولى للوشائع موجـــودة في مجرى واحد، أمـــا الجوانب الثانية فتـــوزع في عـــدة مجارٍ، الشكل (٤-٩- b) . في هـــذا النوع من اللف تتحسن عمليـــة التبديـــل، إلا أنه معقّد وثمنه مرتفـــع، لذلك يُحـــدد اســـتعماله لـــلآلات ذوات الاستطاعات الكبيرة $P_n \geq 500[kW]$.

٤-٣- خطـــوات اللف:

وهي المسافات التي تفصل بين جوانب وشائع اللف على المتحرّض أو بـــين أطـــراف وشائع اللف عند وصلها على المجمّع، ومن الضروري معرفة هـــذه الخطوات لإنجاز عمليـــة اللف وفق أحد أنـــواع اللف السابقة.

وقبل البدء في تعريف الخطوات الرئيسة للف، نورد التعريف الآتي:

- **الخطوة القطبية** τ : وهي المسافة بين مركزي قطبين متجاورين، أو بين محورين حياديين، أو محورين مباشرين متتاليين، وتقاس بواحـــدة الطول، وتساوي عندئـــذٍ:

$$\tau = \frac{\pi . D_a}{2p} \qquad [m , cm] \qquad (٤-٦)$$

حيث D_a: قطـــر المتحرّض؛ [m or cm].

وتقاس بعـــدد المجاري:

$$\tau = \frac{Z}{2p} \qquad \text{خطوة مجرى} \qquad (٤-٧)$$

أو بعـــدد قطـــع المجمّع:

$$\tau = \frac{K}{2p} \qquad \text{خطوة مجمّع} \qquad (٤-٨)$$

أو تقاس بقيمة الزاوية المركزية المقابلة لها:

$$\tau = \frac{360}{2p} = \frac{180}{p} \qquad \text{(درجة ميكانيكية)} \qquad (٤-٩)$$

- خطوة مجمّع : وهي المسافة الفاصلة بين مركزي نصلتين متجاورتين للمجمّع.

- خطوة مجرى : وهي المسافة الفاصلة بين مركزي مجريين متتاليين، ويمكن أن تكـون مجرى جزئي أو مجرى عادي أو حقيقي.

- خطوة اللف على المجمّع: وهي المسافة الفاصلة بين طرفي وشيعة لف على المجمّـع، وتقاس بعدد صفائح المجمّع.

- **خطوة اللف الأولـــى:** وتسمى أيضاً بخطوة اللف الأمامية أو الخطوة الأساسية، ويرمز لها بـــ y_1، وهي المسافة الفاصلة بين جانبي وشيعة مقاساً بعـــدد المجاري (الجانـــب العلـــوي للوشيعة يمثل بخط مستمر، والجانب السفلي يمثل بخط متقطع)، وتساوي:

$$y_1 = \frac{Z \pm \varepsilon}{2p} = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon' \qquad (١٠-٤)$$

حيث:

ε : أصغر عدد يجعل ناتج القسمة عدداً صحيحاً.

ε' : أصغر عدد كسري يجعل y_1 عدداً صحيحاً.

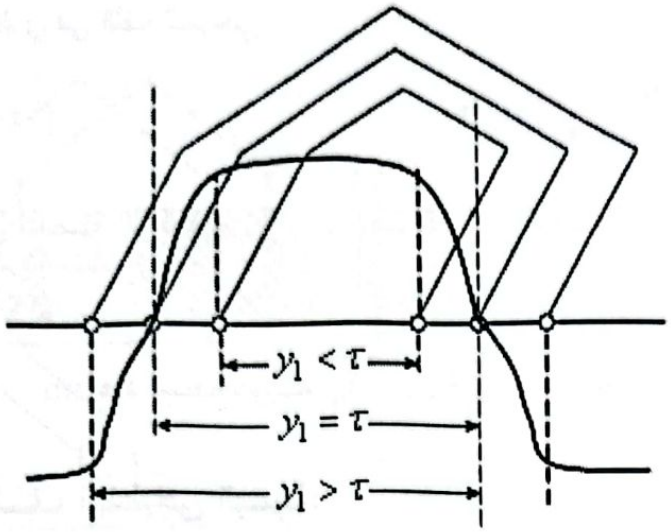
إذا كانت $y_1 = \tau$ تسمى خطوة اللف الأولى y_1 بالخطوة الكاملة أو القطرية.

$y_1 > \tau$ تسمى خطوة اللف الأولى y_1 بالخطوة الطويلة أو المطولة.

$y_1 < \tau$ تسمى خطوة اللف الأولى y_1 بالخطوة القصيرة أو المقصرة.

ويبين الشكل (٤-١٠) خطوة اللف الأولى عند اللف بخطـــوة كاملة أو بخطـــوة طويلة أو بخطـــوة قصيرة.

لا يستعمل اللف بخطـــوة لف مطوّلة أو زائدة، أي $y_1 > \tau$، وذلك لأن هذا النوع من اللف يحقق المواصفات الكهربائية نفسها للآلة التي يحققها اللف بخطوة مقصرة $y_1 < \tau$، لكن في الحالة $y_1 > \tau$ يكون استهلاك النواقل النحاسية والمواد العازلـــة أكثـــر، وبالتـــالي فـــإن التكاليف تزداد بسبب زيادة طول اللفة وبالتالي طول الملف .



الشكل (٤- ١٠) : خطوة اللف الأولى عند اللف بخطـــوة كاملة، طويلة أو قصيرة

- **خطـــوة اللف الثانية:** وتسمى أيضاً بخطوة اللف الخلفية، ويرمز لها بـــ y_2 ، وهي المسافة الفاصلة بين الجانب الثاني لوشيعة لف والجانب الأول للوشيعة التي تليها علـــى المتحـــرّض، ويقصد بالوشيعة التي تليها: الوشيعة التي بدايتها موصولة من نهاية الوشـــيعة الأولـــى علـــى المجمّع.

وهذه الخطوة ضرورية لتحديد في أي جانب يجب وضع الجانب الأول للوشيعة الثانية. تقاس هـــذه الخطوة بعدد المجاري أيضاً، وإذا كان اتجاه القياس والعـــــدد باتجـــاه الخطـــوة الأولى y_1 فإن هذه الخطوة موجبة كما في اللف التموجي. أما إذا كان العدد عكس اتجـــاه y_1 فإن هـــذه الخطوة سالبة كما في اللف الانطباقي.

- **خطـــوة اللف الكلية (الناتجة):** وتسمى أيضاً بخطوة اللف Winding Pitch، ويرمز لهـــا بـــ y، وهي المسافة بين الجانب الأول لوشيعة لف والجانب الأول للوشيعة التي تليها، وهـــي تحدد نوع اللف، وتساوي خطوة اللف على المجمّع: $y = y_C$.

في اللف الانطباقي خطوة اللف الكلية تساوي:

$$y = y_C = \pm m \qquad (١١-٤)$$

وتساوي في اللف التموجي:

$$y = y_C = \frac{K \pm m}{p} \qquad (١٢-٤)$$

وهي محصلة الخطوتين y_1 و y_2 مهما كان نوع اللف:

$$y = y_1 + y_2 \qquad (١٣-٤)$$

حيث m: عدد صحيح، ويساوي: $m = 1 , 2 , 3 , \ldots$

٤-٤- اللـــف الانطباقي البسيط:

ويتألف من وشائع توصل أطرافها مع صفيحتي مجمِّع تقعان بجوار بعضهما بعـضاً. توصل بداية الوشيعة الأولى، الشكل (٤-١١- a)، مع صفيحة المجمِّـــع رقـــم (1)، ونهايـــة الوشيعة الأولى مع الصفيحة رقم (2)، وتوصل بداية الوشيعة الثانية مع نهاية الوشيعة الأولى عبر صفيحة المجمِّع رقم (2)، ونهاية الوشيعة الثانية عبر صفيحة المجمِّع رقم (3) مع بدايـــة الوشيعة التالية، وهكذا... توصل نهاية الوشيعة الأخيـــرة مـــع صـــفيحة المجمِّـــع رقـــم (1) الموصول بها بداية أول وشيعة، أي أن ملف المتحرِّض يغلق دارته خلال دورة واحدة حـــول قلب المتحرِّض.

يوجد نوعان من اللف، وذلك حسب طريقـــة متابعة عملية اللف على المتحرِّض وهما:

- **لـــف يميني:** حيث توضع الوشيعة الثانية على يمين الوشيعة الأولـــى الـــشكل (٤-١١-a) وتكون الخطوة الكلية $y = 1$.

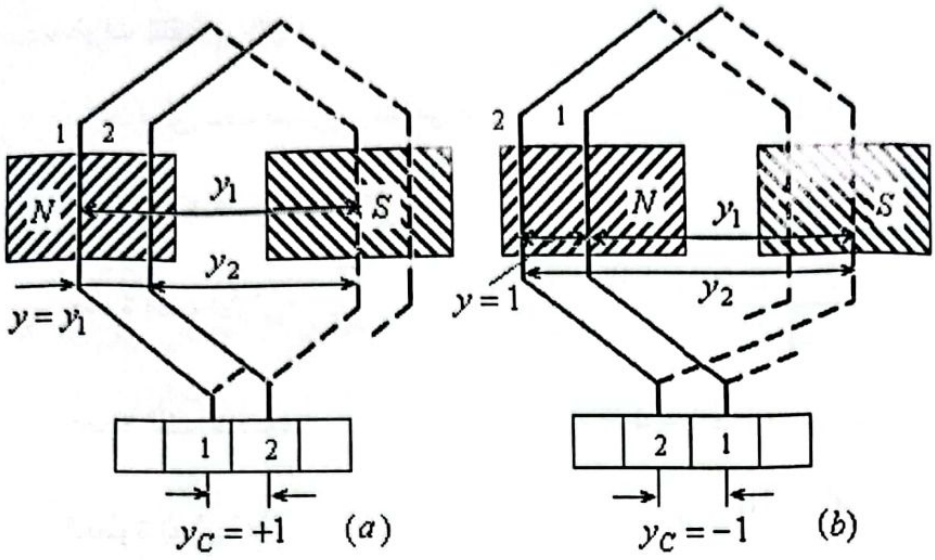
- **لـــف يساري:** حيث توضع الوشيعة الثانية على يسار الوشيعة الأولى الـــشكل (٤-١١ -b) وتكون الخطوة الكلية $y = -1$.

وعليه فإن الخطـــوة الكلية في اللف الانطباقي البسيط هي:

$$y = \pm 1 \qquad (١٤-٤)$$

وخطوة المجمِّع:

$$y_C = y = \pm 1 \qquad (١٥-٤)$$



الشكل (٤-١١): وشائع ملف انطباقي بسيط

a- لف يميني b- لف يساري

تقابل الإشارة (+) الحالة عندما $y_1 > y_2$ ويسمى الملف بالملف المتقـدم أو الملـف اليميني، أما الإشارة (ــ) فتقابل الحالة $y_1 < y_2$ ويسمى الملف بالملف المتراجع أو الملـف اليساري. يفضل عادة استخدام الملف اليميني (الملف المتقدم) لوجـود صـعوبة فـي الملـف المتراجع نتيجة تقاطع الأجزاء الجبهية وزيادة في استهلاك كمية النحاس في الملف.

مثال (١) : تمتلك آلة تيـار مستمر المعطيات الآتية:

- عدد الأقطاب $2p = 4$
- عدد مجاري المتحرّض $Z = 16$
- عدد طبقات اللف طبقتان، أي أن $2u = 2$
- عدد وشائع المتحرّض وعدد صفائح المجمّع $S = K = 16$

بما أن $S_n = u = 1$، فإن عدد المجاري الوهمية $Z_e = Z = 16$

والمطلوب لف الآلة لف انطباقي بسيط .

الحـــل:

- خطوات اللف:

نفترض أن اللف يميني، وبالتالي فإن خطوة اللف الكلية: $y = +1$

خطوة اللف على المجمّع: $y_c = +1$

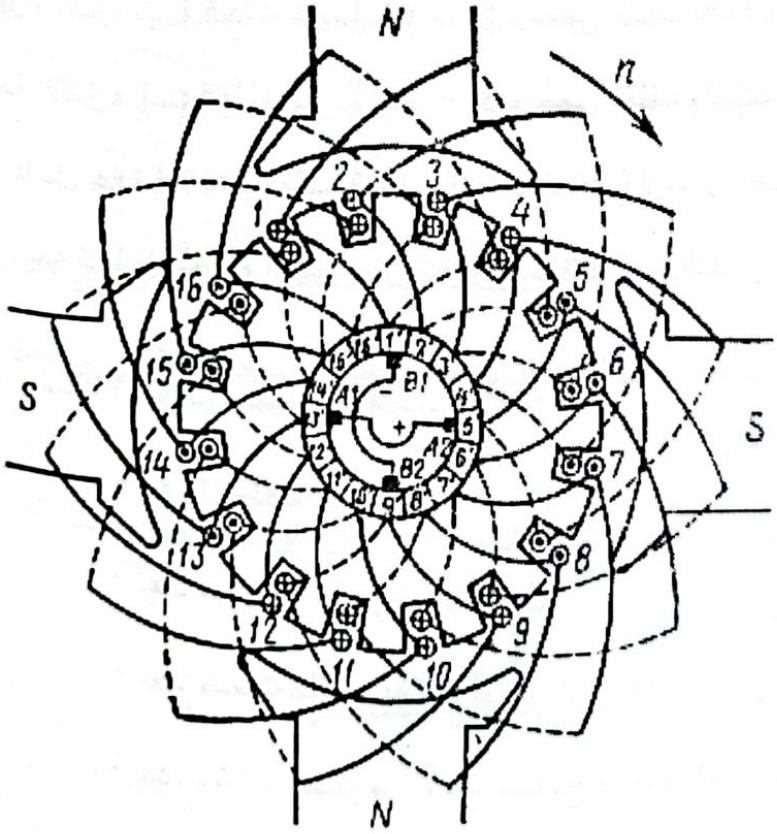
خطوة اللف الأولى: $y_1 = \frac{Z \pm \varepsilon}{2p} = \frac{16 \pm 0}{4} = 4$

خطوة اللف الثانية: $y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3$

الخطوة القطبية: $\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{16}{4} = 4$

أي أن $y_1 = \tau$ ، وبالتالي فإن خطوة اللف كاملة (قطرية) .

يبين الشكل (٤-١٢) مسقطاً أمامياً لآلة تيـــار مستمر بأربعة أقطاب ذي 16 مجرى.



الشكل (٤-١٢): مسقط أمامي لآلة تيار مستمر

$2p = 4$; $Z = 16$; $u = 1$

تم رسم مقاطع وشائع اللف في الشكل (٤-١٢) بشكل دوائر، أما نهايات هـذه الوشائع فقد تم وصلها مع المجمّع بشيء من الصعوبة، لذلك نلجأ إلى عمل انفـراد لمتحرّض الآلـة .

قبل البدء برسم مخطط اللـف، من الضروري رسم جوانب الوشائع وترقيمها حسب وجودها في المجاري، ويفضل أن تكون المسافات متساوية بين جوانب الوشائع.

بما أن عـدد طبقات اللف طبقتان $2u = 2$، فإنه يشغل كل مجـرى جانبين فعـالين من جوانب الوشائع بحيث يقـع أحد الجوانب في الطبقة العليا، و يقـع الجانب الآخـر فـي الطبقة السفلى .

يتم رسم جوانب الوشائع العليا بخطـوط مـستمرة، ويـتم رسـم الجوانـب الـسفلى بخطوط متقطعة.

نرقـم الوشائع بأرقام المجاري التي فيها جوانب الوشائع، فيأخذ الجانب العلوي رقـم المجرى نفسه، أما الجانب السفلي يأخذ الرقم نفسه أيضاً مع إضافة فتحة في الأعلى، فمـثلاً: الجوانب الفعالة في المجرى رقم (1) تأخذ الأرقام: $1'$, 1.

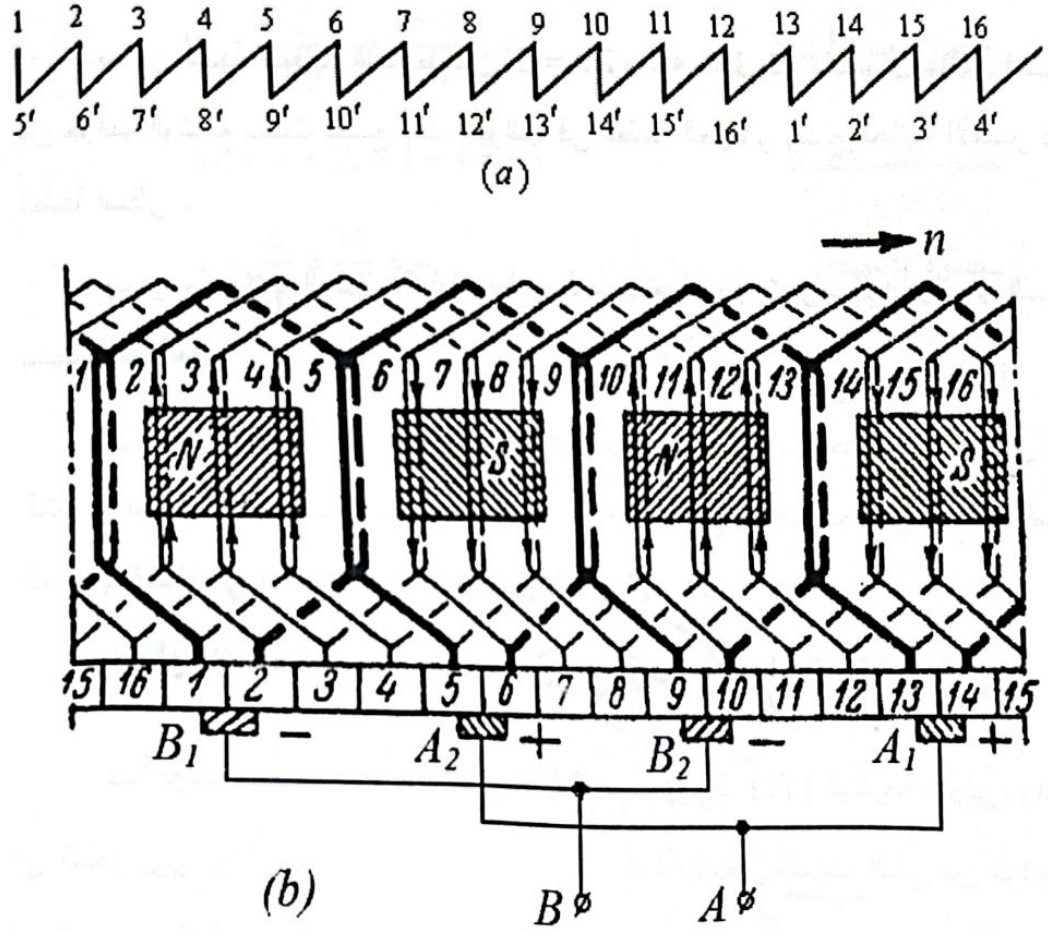
بما أن اللف يميني، سوف نتحرك في أثناء اللف من اليسار إلى اليمين.

نبدأ برسم مخطط اللف من الجانب الأول للوشيعة رقم (1) (الوشيعة الأولى) والواقـع في المجرى رقم (1)، بما أن خطوة اللف الأولى $y_1 = 4$ فإن الجانب الثاني من الوشيعة يقع في المجرى $1 + y_1 = 1 + 4 = 5$ ويأخذ الرقم $5'$. توصل بداية الوشيعة الأولى إلى صـفيحة المجمّع رقـم (1)، ونهاية الوشيعة الأولى (الجانب $5'$) إلى صـفيحة المجمّـع رقـم (2). وبهـذا ننتهي من عملية وصل الوشيعة الأولى ($5'-1$).

تتوزع الجوانب الفعّالـة للوشائع وأقسامها الجبهية عـادة بشكل متناظر بالنسبة إلـى صفائح المجمّع.

أما الوشيعة رقم (2) فجانبها الأول موجـود في الطبقة العلوية في المجـرى رقـم (2)، أما جانبها الثاني فموجود في الطبقـة السفلية في المجرى رقـم (6) ويأخذ الـرقم $6'$،

وبالتالي توصل بداية الوشيعة (2 – 6′) إلى صفيحة المجمّع رقـــم (2)، ونهايتها إلى صفيحة المجمّع (3). وبهـــذه الطريقـــة يتم وصل باقي الوشائع مع بعضها كما هو مبين في جـــدول اللف المبين في الشكل (٤-١٣-a) .



الشكل (٤-١٣): مخطط اللف لآلة تيار مستمر – لف انطباقي بسيط

$2p = 4$; $Z = 16$; $u = 1$; $K = 16$; $Z_c = 16$

لتحديد قطبية المسفرات نفترض أن الآلة تعمل كمولدة وأن المتحرّض (الجزء الدوار) يدور باتجاه عقارب الساعة، وبتطبيق قاعـــدة اليد اليمنى نحـــــدد اتجـــاه القـــوى المحرّكـــة الكهربائية والتيـــار المار في الوشائع، الشكل (٤-١٣- b)، ومن خـــلال ذلك نتوصل إلى أن المسفرتين A_1 و A_2 والتي يخـــرج منها التيـــار إلى الـــدارة الخارجية تُعـــدان موجبتان ،

أما المسفرتان B_1 و B_2 فهما سالبتان. توصل المسفرتان ذات القطبية المتشابهة مع بعـضهما بعضاً، ثم توصل إلى مأخذ الآلـــة.

يمكن تعريف محور الحياد الهندســي Geometrical Neutral Line بأنــه الخــط المرسوم على سطح المتحرّض والموجود بين قطبين مغناطيسيين متجاورين والذي ينعدم فيــه الفيض المغناطيسي $B = 0$ ويساوي إلى الخطوة القطبية τ. فمحور الحياد الهندسي في هــذا المثال يقسم محيط المتحرّض إلى أربعة أقسام متساوية $(2p = 4)$.

توضع الأقطــاب في منتصف المسافة وعلى بعــد متساوٍ عن خط الحياد الهندســي، وتشغل مسافة تساوي $\tau\,(0{,}85 - 0{,}75)$.

نلاحــظ في الشكل (٤-١٣- b) وشائع مرسومة بخط سميك وهــي وشائع مقصورة.

في أثناء دوران المتحرّض تتعرض بعض الوشائع لدارات قصيرة عبر المسفرات، تقع الوشيعة المقصورة بالمسفرات في أثناء التبديل على خــط الحياد الهندسي، أو تقع قريبة منــه حتى تكون القــوى المحرّكة الكهربائية المتحرّضة في هــذه الوشيعة أقل ما يمكن وحتــى لا تمر تيــارات تؤدي إلى زيادة تحميل المسفرات.

لتحديد وضع المسفرات في زمن ما، نضع المسفرة الأولى بحيث تمس الصفيحتين (1) و(2)، أما وضع المسفرات الأخرى فيتحدد بحيث تكون المــسافة بــين منتــصفي مــسفرتين متجاورتين لهما قطبية مختلفة بعدد الصفائح وتساوي إلى:

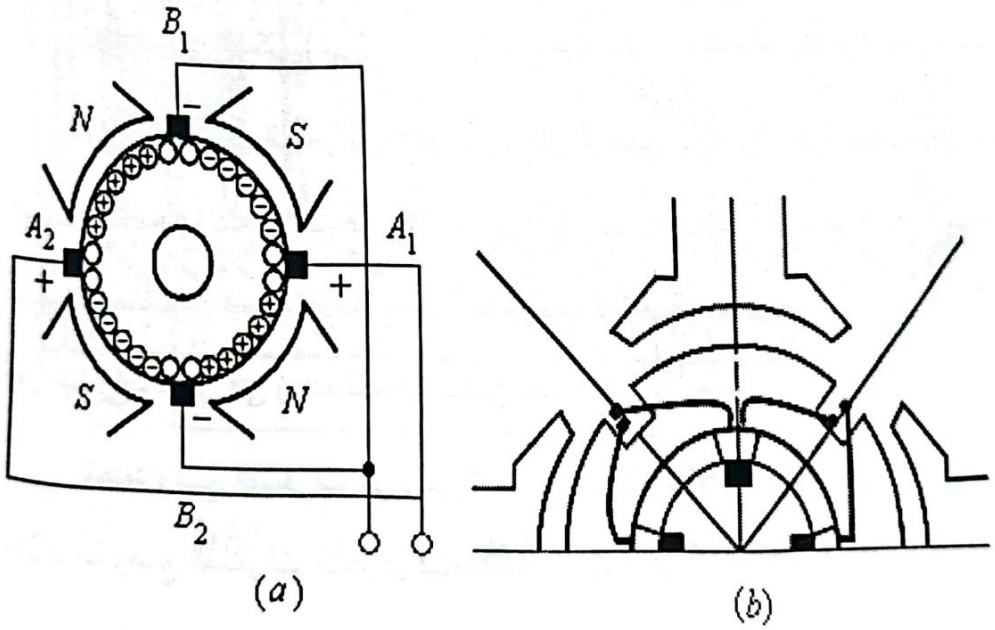
$$y_b = \frac{K}{2p} = \frac{16}{4} = 4$$

وهــذا يتوقف على طول الخطوة القطبية τ، وبالتالي تمس المسفرة الثانية الــصفيحتين (5) و(6)، وهكذا ...

هناك طريقــة أخــرى لمعرفة توضع المسفرات على المجمّع: نتخيل أن الاتصال الكهربائي

لملفات المتحرّض مع الدارة الخارجية لا يتم عن طريق المجمّع، بل يتم مباشرة من خلال الأقسام الفعالة للملف، الشكل (٤-١٤- a).

إن أعظم قوة محرّكة كهربائية يمكن الحصول عليها في هذه الحالة تتفق مع وضع المسفرات على المحاور الحيادية الهندسية، لأنه في هذه الحالة تمتلك الوشائع كلها قوة محركة كهربائية لها الاتجاه نفسه، ويحصل ذلك إذا كانت المسفرات واقعة مقابل منتصف الأقطاب، (لأن صفائح المجمّع مزاحة بالنسبة إلى الأجزاء الفعالة للوشائع بمقدار نصف خطوة قطبية أي $\frac{1}{2}\tau$) الشكل (٤-١٤-b)، وبالتالي من أجل الانتقال إلى الوضع الحقيقي للمسفرات يجب أن يتم توضع المسفرات على المجمّع تحت منتصف الأقطاب الرئيسة كما هو موضح في الشكل (٤-١٣- b) .



الشكل (٤-١٤) : توضع المسفرات على المجمّع

- **عدد الدارات التفرعية:** إذا تتبعنا مخطط اللف [الشكل (٤-١٣- b)] نرى أنه يتألف من عدة فروع أو دارات تفرعية، كل فرع يشمل عدة وشائع موصولة على التسلسل وذا اتجاه واحد للتيار ويقع بين مسفرتين متجاورتين مختلفتين بالقطبية.

أما توزع الوشائع على الفروع فهو مبين في الشكل (٤-١٥)، ويدعى بالمخطط الكهربائي. وللحصول على هذا المخطط نرسم المسفرات وصفائح المجمّع التي تتلامس مع

هذه المسفرات، وبعدها نبدأ بالوشيعة (1) والتي تقصر مع المسفرة B_1 ، وكذلك الوشـــائع (2) و(3) و(4) تشكل دارة تفرعية. وهكـــذا بالطريقة نفسها نتابع الرسم فنحصل على المخطـــط الكهربائي. ومن المخطط الكهربائي نجد أن القوة المحركة الكهربائية لملـــف المتحـــرّض E_a تتحدد من قيمة القوة المحركة لدارة تفرعية واحدة E'_a ، حيث:

$$E_a = E'_a \qquad (١٦-٤)$$

أما تيار الملف فيساوي إلى مجموع تيارات الدارات التفرعية المشكلة للملف، أي أن:

$$I_a = 2a.i_a \qquad (١٧-٤)$$

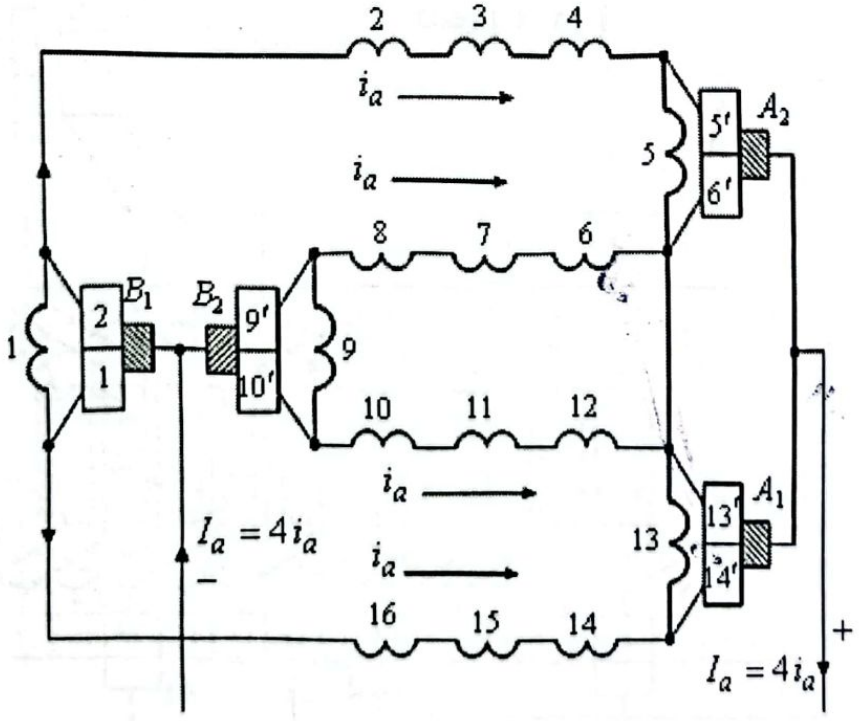
حيث:

2 a: عدد الدارات التفرعية لملف المتحرِّض.

i_a: تيـــار الدارة التفرعية الواحدة و يقاس بـــ [A] .

في الملف الانطباقي البسيط، يساوي عـــدد الدارات التفرعية إلـــى عـــــدد الأقطـــاب الرئيسة للآلـــة، أي:

$$2a = 2p \qquad (١٨-٤)$$



الشكل (٤-١٥) : المخطط الكهربائي للملف الانطباقي البسيط

عدد الدارات التفرعية 2 a = 4

مثال (٢) : يبين الشكل (٤-١٧) مخطط اللـــف لآلـــة تيـــار مستمر لها المعطيات الآتية :

$$2u = 2 \;\; ; \;\; Z = 18 \;\; ; \;\; 2p = 4$$
$$Z_c = 18 \; ; \; K = 18 \;\; ; \;\; S = 18 \; ;$$

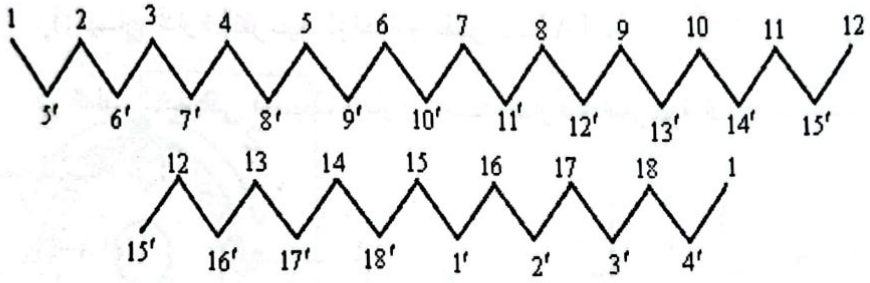
خطوة اللف الأولى: $$y_1 = \frac{Z \pm \varepsilon}{2p} = \frac{18-2}{4} = 4$$

خطوة اللف على المجمّع: $$y_C = +1$$

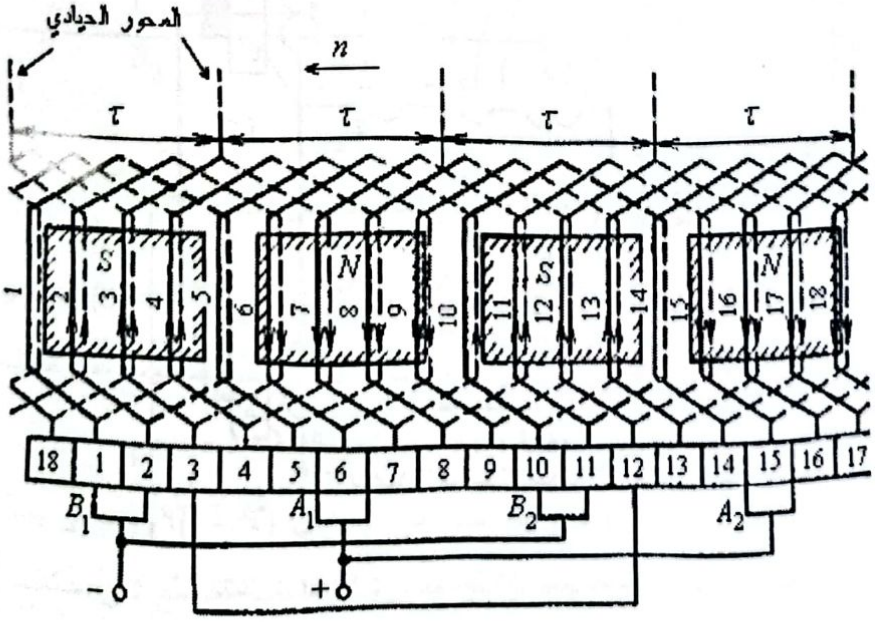
خطوة اللف الثانية: $$y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3$$

الخطوة القطبية: $$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{18}{4} = 4\,\frac{1}{2}$$

أما الشكل (٤-١٦) فيبين مخطط جـــدول اللف للمثال المدروس.



الشكل (٤-١٦)



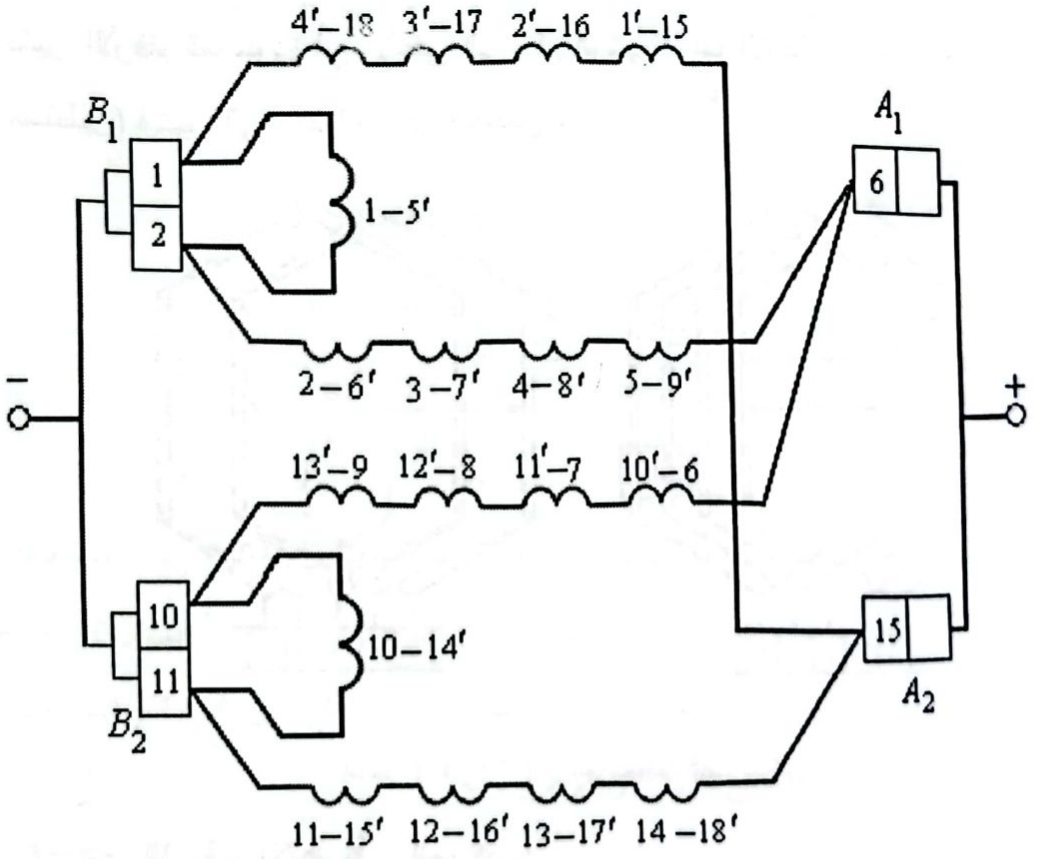
الشكل (٤-١٧) : ملف انطباقي بسيط ، $Z = 18 \; , \; 2p = 4 \; , \; u = 1$

تم تحديد اتجاه القوى المحرّكة الكهربائية، الشكل (٤-١٧) حسب قاعدة اليد اليمنى، وبفرض أن الآلـــة تعمل كمولدة، والجزء الدوار يدور بعكس اتجاه عقارب الساعة، أما بالنسبة إلى توضع المسفرات فنضع المسفرة الأولى (المسفرة السالبة B_1) تمس الصفيحتين (1) و(2) ، أما المسفرات الأخرى فتم تحديد وضعيتها بحيث تكون المسافة مساويةٍ إلى :

$$y_b = \frac{K}{2p} = \frac{18}{4} = 4\frac{1}{2}$$

$4\frac{1}{2}$ صفيحة مجمّع (أو خطوة مجمّع) ، أي أن المسفرة الثانية تمس صفيحة المجمّع رقم (6) ، أما المسفرة الثالثة فتمس الـــصفيحتين (11) و(10) ، والمـــسفرة الرابعـــة تمـــس الصفيحة (15) .

أما الشكل (٤-١٨) فيبين عدد الدارات التفرعية لمخطط اللف، وتـــساوي إلـــى أربـــع دارات تفرعية، أي: $2a = 2p = 4$.



الشكل (٤-١٨) : المخطط الكهربائي، ويبين عـــدد الدارات التفرعية

درسنا في المثال (٢) متحرّض آلـــة تيـــار مستمر يمتلك المعطيات الآتيـــة :

$2p = 4$; $S = Z = K = Z_c = 18$ ، وعـــدد طبقات اللف اثنتان $2u = 2$

سندرس الآن نوعاً آخر من اللف لمتحرض آلة التيار المستمر :

$2p = 4$; $Z = 18$ ، ولكن عند $u = 2$ أو $2u = 4$، أي أن عدد طبقات اللف أربعة،

وبالتالي فإن $S = K = Z_c = 36$.

عند هـــذا سنحتفظ بخطوة اللـــف الأولى نفسها، خطـــوة مجرى حقيقي $y_{1Z} = 4$.

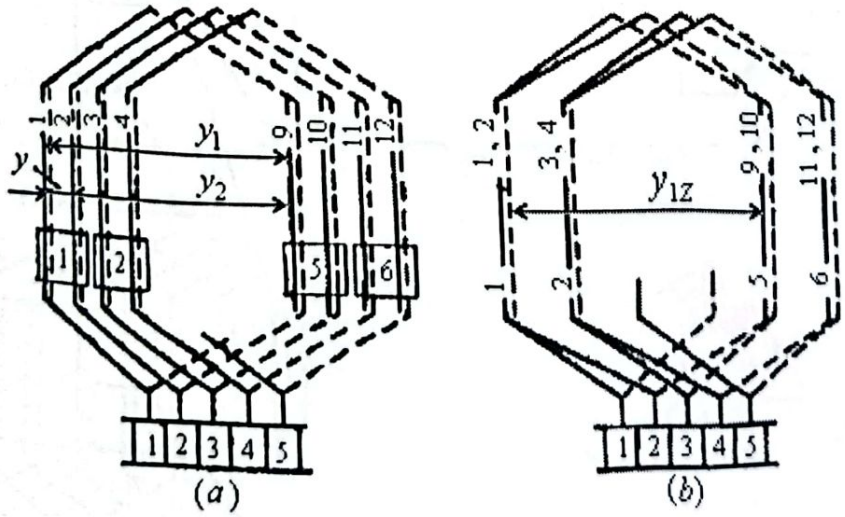
يمكن كتابة خطـــوة اللف بعدد المجاري الوهمية (خطوة مجرى وهمي):

$$y_1 = u.y_{1Z} = 2 \times 4 = 8$$

أما خطوة اللف الكلية (خطوة مجرى وهمي) : $y = y_1 = +1$

وخطوة اللف الثانية (خطوة مجرى وهمي) : $y_2 = -7$

مخطط اللف لهـــذا الملف يمكن رسمه بأحد الشكلين المبينين على الشكل (٤-١٩)، إذ تشير الأرقام الموجودة في الأعلى إلى رقم الوشيعة، أما الأرقام الموجودة في الأسفل (ضمن مستطيل) فتشير إلى رقم المجرى الحقيقي .



الشكل (٤-١٩): رسم مخطط اللف بشكلين مختلفين

٤-٥- اللـــف الانطباقي المركّب:

يستخدم اللف الانطباقي المركّب عندما يكون من الضروري الحصول على ملف

انطباقي لمتحرّض آلة تيار مستمر بعدد كبير من الدارات التفرعية من أجل رفع قيمة التيار الذي يمكن سحبه أو إمراره. ويستخدم في الآلات الكبيرة ذات التوتر المنخفض .

يتألف هـذا الملف من عدة ملفات انطباقية بسيطة متوضعة على متحرّض واحد، وكل ملف بسيط والذي يتشكل منه اللف الانطباقي المركّب يغلق بشكل مستقل على نفسه. يساوي عدد الدارات التفرعية في اللف الانطباقي المركّب $2\ a = 2\ p.m$ حيث m هو عدد صحيح أكبر من الواحد $(m = 2,3,...)$ ، وهي تساوي عدد اللفات الانطباقية البسيطة والتي يتشكل منها الملف الانطباقي المركّب (تكون عادة $m = 2$).

مثال (٣): المطلوب رسم مخطط اللف الانطباقي المركّب اليميني لآلة تيار مستمر تمتلك المعطيات الآتية: $2p = 4$; $Z = 16$; $u = 1$; $m = 2$

بما أن عدد طبقات اللف $2u = 2$ ، فإن $S = K = Z_e = uZ = 16$

- خطوات اللف:

خطوة اللف الكلية: $y = +m = +2$

خطوة اللف على المجمّع: $y_c = +2$

خطوة اللف الأولى: $y_1 = \frac{Z \pm \varepsilon}{2p} = \frac{16}{4} = 4$

خطوة اللف الثانية: $y_2 = y - y_1 = 2 - 4 = -2$

الخطوة القطبية: $\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{16}{4} = 4$

يبين الشكل (٤-٢٠- b) مخطط اللف الانطباقي المركّب للمثال (٣)، ويتألف هذا الملف من ملفين انطباقيين بسيطين، ينتمي إلى الملف الأول الوشائع ذات الأرقام الفردية والموصولة إلى المجمّع ذات الأرقام الفردية. أما الملف الثاني فيتألف من الوشائع المرقمة بأرقام زوجية والموصولة إلى المجمّع ذات الأرقام الزوجية.

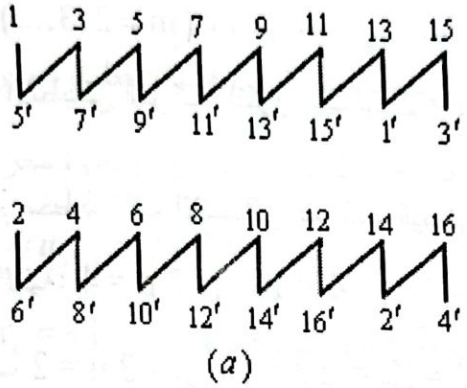
إن كل ملف بسيط ينغلق على نفسه، أما كهربائياً فإن الملفان متصلان عن طريق المسفرات فقط والتي يجب أن يؤمن عرضها تغطية قدرها ما لا يقل عن صفيحتي مجمّع.

يبين الشكل (٤-٢٠- a) جدول اللـــف، إذ ينتج لدينا دارتين مستقلتين، تتألف الدارة الأولى من الوشائع الآتيـــة:

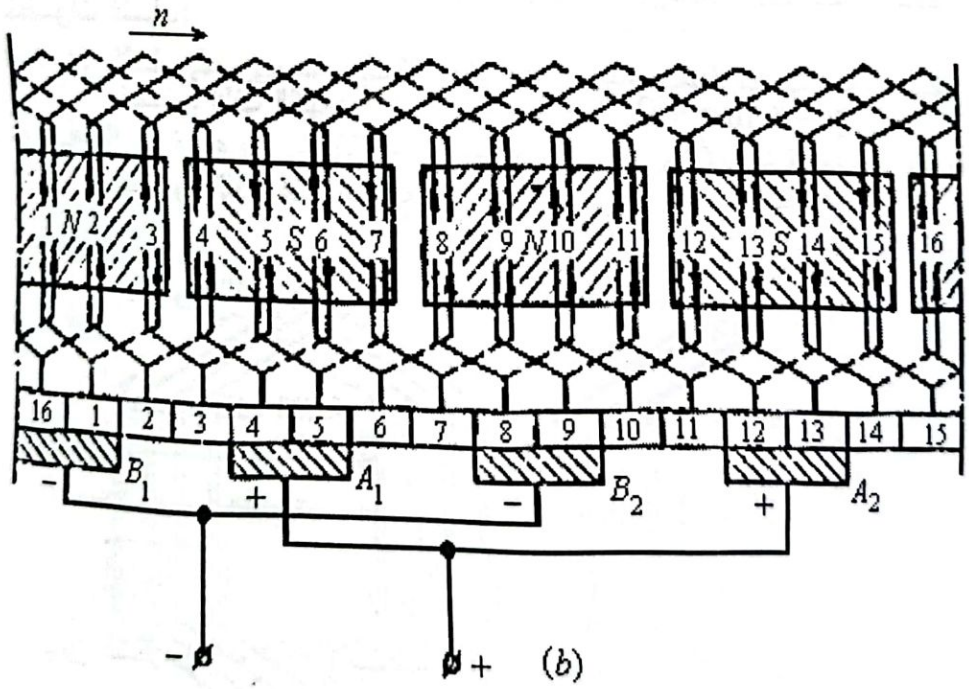
$$1,5-3,7'-5,9'-7,11'-9,13'-11,15'-13,1'-15,3'$$

وتتألف الدارة الثانيـــة من الوشائع الآتيـــة:

$$2,6'-4,8'-6,10'-8,12'-10,14'-12,16'-14;2'-16,4'$$



(a)



(b)

الشكل (٤-٢٠) : مخطط اللف الانطباقي المركّب للمثال رقم (٣)

٤-٦- اللـــف التموجـــي البسيط :

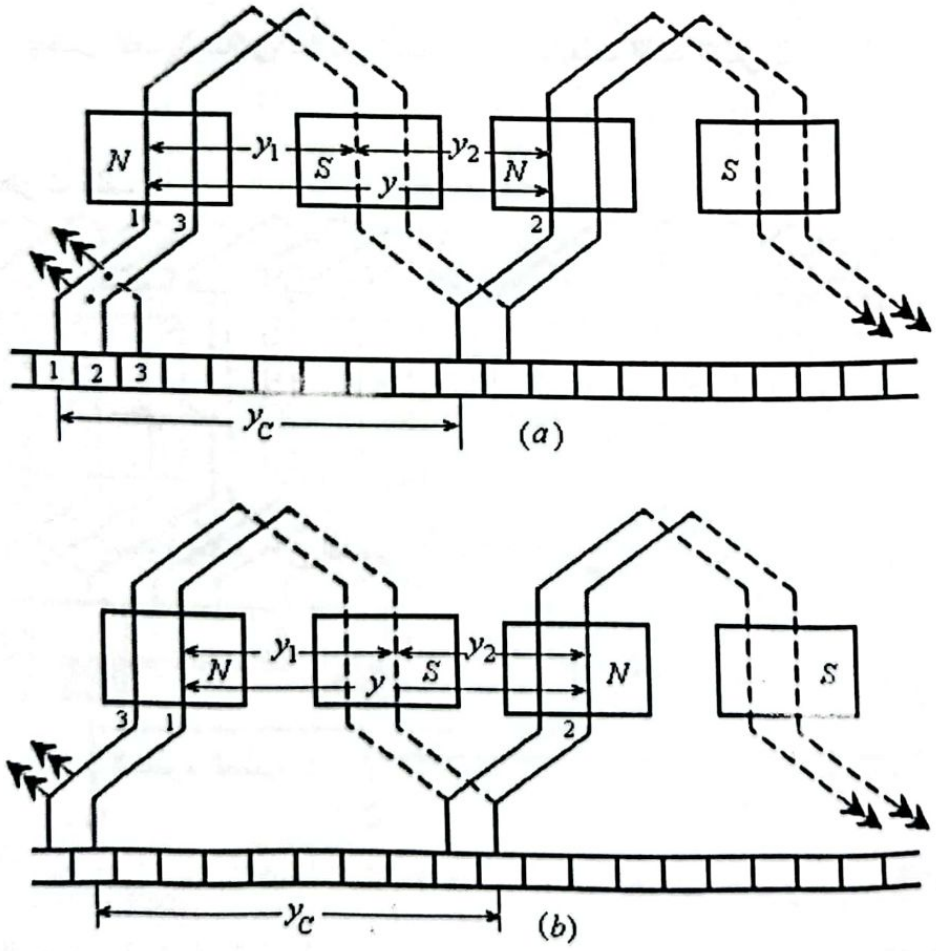
ويسمى باللف التسلسلي، ويستخدم عندما يكـــون عـــدد أزواج الأقطـــاب أكبـــر من الواحد من أجل رفع قيمة القـــوة المحرّكة الكهربائية، و يُستخدم عندما يكون عدد المجاري فردي بشكل رئيسي .

يتم الحصول عليه من الوصل التسلسلي للوشائع الواقعة تحت أزواج الأقطاب المختلفة. ويمتاز هذا النوع من اللف بأن خطوة اللف الأولى y_1، وخطوة اللـف الثانيـة y_2، تنفـذان بالاتجاه نفسه، وتكون الخطوة الكلية $y = y_1 + y_2$ معادلة تقريباً لخطوتين قطبيتين، أما خطوة اللف على المجمّع فتساوي إلى الخطوة الكلية، أي: $y = y_C$.

عند الدوران، حول المجمّع، دورة واحدة يعود الملف إلى صفيحة المجمّـع المجـاورة لتلك الصفيحة التي بدأنا منها الدوران (من اليمين أو اليسار).

تحتوي كل دورة لف على المتحرّض على (p) وشيعة، وتنتهي الدورة الواحدة عنـد صفيحة المجمّع التي تقع بجوار صفيحة البـدء، إما على يسارها، أو على يمينها.

يبين الشكل (٤-٢١- a) لـف تموجـي بسيط يميني لآلـة رباعية الأقطـاب، أما الـشكل (٤-٢١- b) فيبين لف تموجي بسيط يساري.



الشكل (٤-٢١) : لف تموجي بسيط لآلة رباعية الأقطاب

a- لف يميني b- لف يساري

وتساوي خطوة اللف الكلية على المتحرض في هذا النوع من اللف :

$$y = \frac{Z \pm 1}{p} \qquad (٤-١٩)$$

وخطوة اللف على المجمع مقدرة بعدد صفائح المجمع :

$$y_c = y = \frac{K \pm 1}{p} \qquad (٤-٢٠)$$

حيث الإشارة السالبة توافق اللف اليساري ، والإشارة الموجبة توافق اللف اليميني .

تستخدم الملفات اليسارية عادة ، لأن الملفات اليمينية تستهلك كمية أكبر من النواقل النحاسية في القسم الجبهي بسبب تصالبها .

مثال (٤) : المطلوب لف آلة تيار مستمر لف تموجي بسيط تمتلك المعطيات الآتية :

$$2p = 4 \quad ; \quad Z = 17 \quad ; \quad u = 1$$

يفضل اللف اليساري عادة . وبما أن عدد طبقات اللف اثنتان $2u = 2$ ، فإن :

$$S = K = u\,z = Z_c = 17$$

- خطوات اللف :

خطوة اللف الأولى :
$$y_1 = \frac{Z \pm 1}{2p} = \frac{17-1}{4} = 4$$

خطوة اللف الكلية :
$$y = \frac{Z-1}{p} = \frac{17-1}{2} = \frac{16}{2} = 8$$

خطوة اللف على المجمع :
$$y_c = y = \frac{K-1}{p} = \frac{17-1}{2} = 8$$

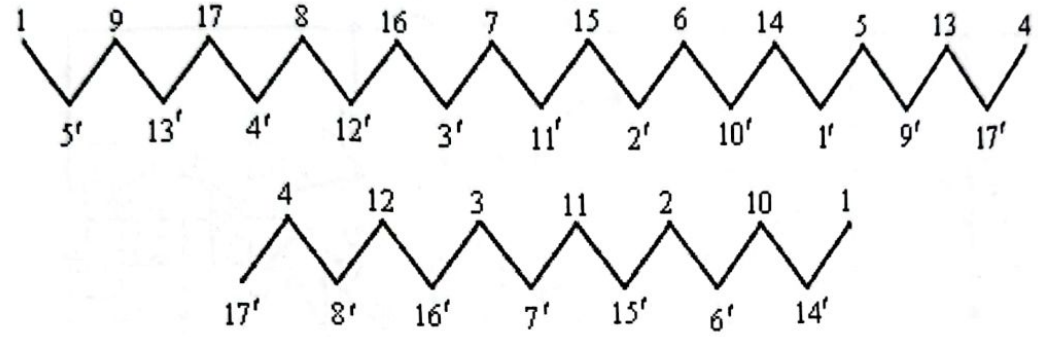
خطوة اللف الثانية :
$$y_2 = y - y_1 = 8 - 4 = 4$$

الخطوة القطبية :
$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{17}{4} = 4.25$$

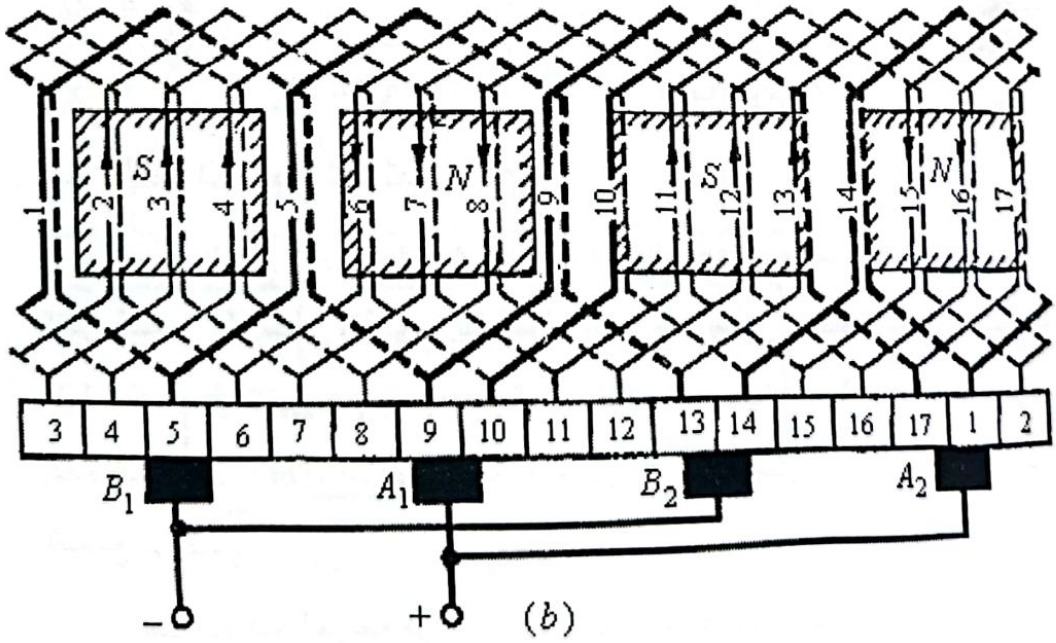
عند تنفيذ مخطط اللف الشكل (٤-٢٢ *b*) نبدأ بالجانب العلوي للوشيعة الأولى والواقع في المجرى رقم (1) والمتصل مع صفيحة المجمع رقم (1) ، أما الجانب الثاني للوشيعة الأولى فيقع في المجرى رقم $1 + y_1 = 1 + 4 = 5$ ونشير إليه بالرقم $5'$ حيث توصل نهايته

إلى الصفيحة رقم $1+y_C=1+8=9$ والتي بدورها توصل مع الجانب العلوي (9) للوشيعة رقم (9) التالية في مخطط اللف .

وهكذا نستمر في وصل وشائع اللف بين بعضها ومع صفائح المجمع حسب جدول اللف المبين في الشكل (٤-٢٢ a) والذي يمكننا من رسم مخطط اللف . عرض المسفرة أو الفحمة تساوي إلى عرض صفيحة المجمع . يجب أن توضع الفحمات أو تمس صفائح المجمع التي تتصل مع الوشائع المتوضعة على المحور الحيادي أو قريبة منه .



(a)



(b)

الشكل (٤-٢٢) ملف تموجي بسيط

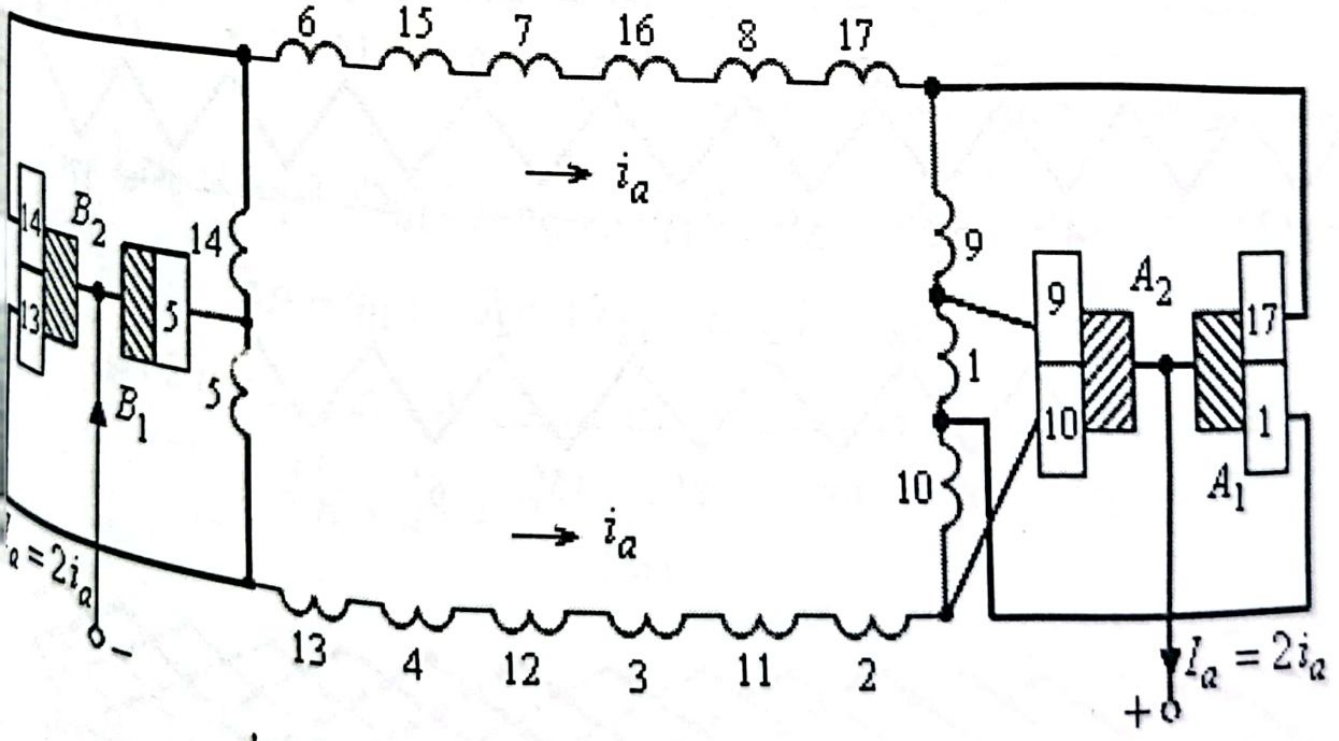
$Z=17$, $2p=4$, $u=1$

a- جدول اللف

b- مخطط اللف

عدد الدارات التفرعية :

في الملف التموجي البسيط ، عدد الدارات التفرعية يساوي اثنان فقط ، أي $2a=2$، لذلك كان بالإمكان عند رسم المخطط الكهربائي للمثال الأخير والمبين في الشكل (٤-٢٣) الاكتفاء باستخدام مسفرتين فقط يفصل بينهما خطوة قطبية . لكن يكون الملف قد خالف نظا التماثل ويصبح عدد الوشائع في الدارات التفرعية غير متساوٍ ، لذلك يوضع عادة عدد من المسفرات يساوي عدد الأقطاب الرئيسة في الآلة ، وهذا يسمح بتخفيض قيمة التيار المار في كل مسفرة .



الشكل (٤-٢٣) الدارات التفرعية للملف التموجي البسيط