١-٥-١- المـــواد الفعّـــالـــة المستعملة في الآلات الكهربائية:

تدخل المواد الفعّـــالة، المستخدمة في تصنيع الآلات الكهربائيـــة، الدارات المغناطيسية و الدارات الكهربائيـــة و تنقسم بدورها إلى: مـــواد مغناطيسية و مـــواد ناقلة.

١-٥-١-١- المـــواد المغناطيسية:

تتمتـــع المـــواد في الطبيعة بخواص مغناطيسية تختلف من مادة إلى أخرى، و يمكـــن تصنيف هذه المواد تبعـــاً لهـــذه ا لخواص المغناطيسية إلى:

١- **المـــواد غيـــر المغناطيسية:** يكـــون عامـــل النفـــاذ المغناطيسي النسبي μ_r Relative Magnetic Permeability مساويا تقريباً للـــــواحد أي $\mu_r \approx 1$ و هـــي تقـــسم بدورها إلى:

- مواد غيـــر قابلة للتمغنط Paramagnetic Materials وهي مواد يكون فيها عامل النفاذ المغناطيسي النسبي أكبر بقليل من الواحد مثل الألمنيوم حيث $\mu_r = 1{,}0002$ و تكون قيمة القابليـــة المغناطيسية أكبر من الصفـــر.
- مواد المغناطيسية العكسية Diamagnetic Materials وهي مواد يكون فيها عامل النفاذ المغناطيسي النسبي أصغر بقليل من الواحد مثل النحاس حيث $\mu_r = 0{,}999$ و تكون قيمة القابليـــة المغناطيسية أصغر من الصفـــر.

٢- **المـــواد الحـــديدية المغناطيسية أو الفيرومغناطيسية: Ferromagnetic Materials** ويكون عامل النفاذ المغناطيسي النسبي فيها أكبر بكثير من الواحد $\mu_r \gg 1$ أي عند وضعها في مجال مغناطيسي قوي تصبح مغناطيساً وعند إزالة المجال الممغنط تحتفظ ببعض المغناطيسية التي اكتسبتها. من هذه المواد الحديد وخلائطه والنيكل والكوبالـــت إلا أن ارتفـــاع أسـعار الأخيرة يجعلها في المرتبة الثانية.

إن المواد المغناطيسية المستعملة في الآلات الكهربائية تختلف حسب طبيعـــة الـــسيالة المغناطيسية المارة في أجزاء الآلـــة، فاختيار المادة المغناطيسية لكـــل جـــزء مـــن أجـــزاء الـــدارة المغناطيسية للآلـــة الكهربائية يتعلق بكون هذه السيالة المارة في هذا الجـــزء ثابتـــة (كأقطاب آلات التيار المستمر والآلات المتواقتة) أو ســـيالة متغيـــرة كمـــا فـــي المحـــولات

١-٥-١- المواد الفعّالة المستعملة في الآلات الكهربائية:

تدخل المواد الفعّالة، المستخدمة في تصنيع الآلات الكهربائية، الدارات المغناطيسية و الدارات الكهربائية و تنقسم بدورها إلى: مواد مغناطيسية و مواد ناقلة.

١-٥-١-١- المواد المغناطيسية:

تتمتع المواد في الطبيعة بخواص مغناطيسية تختلف من مادة إلى أخرى، و يمكن تصنيف هذه المواد تبعاً لهذه ا لخواص المغناطيسية إلى:

١- **المواد غير المغناطيسية:** يكون عامل النفاذ المغناطيسي النسبي μ_r Relative Magnetic Permeability مساويا تقريباً للواحد أي $\mu_r \approx 1$ و هي تقسم بدورها إلى:

- مواد غير قابلة للتمغنط Paramagnetic Materials وهي مواد يكون فيها عامل النفاذ المغناطيسي النسبي أكبر بقليل من الواحد مثل الألمنيوم حيث $\mu_r = 1{,}0002$ و تكون قيمة القابلية المغناطيسية أكبر من الصفر.
- مواد المغناطيسية العكسية Diamagnetic Materials وهي مواد يكون فيها عامل النفاذ المغناطيسي النسبي أصغر بقليل من الواحد مثل النحاس حيث $\mu_r = 0{,}999$ و تكون قيمة القابلية المغناطيسية أصغر من الصفر.

٢- **المواد الحديدية المغناطيسية أو الفيرومغناطيسية: Ferromagnetic Materials** ويكون عامل النفاذ المغناطيسي النسبي فيها أكبر بكثير من الواحد $\mu_r \gg 1$ أي عند وضعها في مجال مغناطيسي قوي تصبح مغناطيساً وعند إزالة المجال الممغنط تحتفظ ببعض المغناطيسية التي اكتسبتها. من هذه المواد الحديد وخلائطه والنيكل والكوبالت إلا أن ارتفاع أسعار الأخيرة يجعلها في المرتبة الثانية.

إن المواد المغناطيسية المستعملة في الآلات الكهربائية تختلف حسب طبيعة السيالة المغناطيسية المارة في أجزاء الآلة، فاختيار المادة المغناطيسية لكل جزء من أجزاء الدارة المغناطيسية للآلة الكهربائية يتعلق بكون هذه السيالة المارة في هذا الجزء ثابتة (كأقطاب آلات التيار المستمر والآلات المتواقتة) أو سيالة متغيرة كما في المحولات

ومتحرّض الآلات الدوّارة. أيضاً يتعلق اختيار نوع المادة المغناطيسية بحدود الضياعات الحديدية المسموح بها.

يُستخدم في بناء الآلات الكهربائية المواد الحديدية اللينة والتي تتصف بعروة بطاء مغناطيسي Hysteresis Loop ضيقة وحادة (مساحة العروة صغيرة) وتستخدم هذه المواد أيضاً في أجهزة القياس وغيرها أما المواد الفيرومغناطيسية القاسية فتكون العروة أوسع وتستخدم لتصنيع المغانط الدائمة.

عندما تكون السيالة المغناطيسية متغيرة غالباً ما تكون الأجزاء الحديدية مجمّعة من صفائح حديدية رقيقة و ذلك من أجل التقليل من الضياعات التي تسببها التيارات الإعصارية Eddy Current. تكون هذه الصفائح الحديدية، ماركات مختلفة، مسحوبة على الساخن أو على البارد و بسماكة mm(0,35÷0,5) و معزولة عن بعضها البعض بطبقة رقيقة من الورنيش أو الورق بسماكة 0,035 mm.

تؤثر نظافة الحديد تأثيراً فعّالاً على الضياع بالبطاء المغناطيسي، وتسوء صفاته المغناطيسية ويزداد ضياعه بمجرد وجود آثار ضئيلة من عنصر الفحم أو الأوكسجين لذا يُعمد عند استخراج الحديد إلى استعمال طريقة التحليل الكهربائي ثم صهر الحديد وصبه وإحمائه للحصول عليه نظيفاً منقى.

لأجل إنقاص الضياعات الحديدية، الناتجة عن ظاهرة البطاء المغناطيسي والتيارات الإعصارية، يُعمد إلى إدخال عنصر السيليسيوم Siliciumإلى الحديد حيث تزداد مقاومته النوعية الكهربائية.

إن تحسن صفات الحديد المغناطيسية بإضافة عنصر السيليسيوم يتم على حساب صفاته الميكانيكية، لأن خليطة الحديد مع السيليسيوم تصبح هشة غير قابلة لعمليات السحب والطرق والثني. لذا تُحدد نسبة السيليسيوم المئوية فيه، بحيث لا تتعدى% (4÷5) فقط، وذلك حفاظاً على صفات الحديد الميكانيكية.

نلخّص صفات المواد المغناطيسية المستعملة في الآلات الكهربائية بما يلي:

١- نفاذيتها (سماحيتها) المغناطيسية عالية تزيد عن نفاذية الهواء

بـــ (250÷1000000) مـــرة.

٢ – تحريضها المغناطيسي الأعظمي عـــالٍ ويتراوح بيـــن (1÷2,5) Wb/m^2.

٣ – علاقة التحريض المغناطيسي B بشدة المجال غير خطية وتتعلق باتجاه التمغنط.

٤ – عروتها المغناطيسية ضيقة.

٥ – تحتفظ بمغناطيسية داخلية متبقية Residual Magnetism حتى بعد إزالة الساحة المغناطيسية عنها.

١-٥ -١-٢- المـــواد الناقلة:

آ- النحـــاس:

يُعـــد النحاس من أكثـــر المعادن الناقلة استعمالاً في الآلات الكهربائية لحسن صـفاته الكهربائية والحرارية، إذ يدخل في صنع ملفاتها الرئيسية والمساعدة ومرابطهـــا ووصـــلاتها. يستعمل النحاس وهو نقي جداً ويستحصل بالتحليل الكهربائي، يتصف النحاس بناقليته الجيـدة للكهرباء إذ تبلغ مقاومته الكهربائية النوعية عند درجة الحرارة (20 درجـــة مئويـــة) قيمـة: ($17,24 .10^{-9}\ \Omega . mm^2/m$) وهي تتعلق تعلقا ملحوظا بتلوثه بالشوائب الغريبة. الـوزن النوعي للنحاس ($8,9\ g/cm^3$) ودرجة انصهاره ($1083\ C^o$).

يتصف النحاس أيضاً بثباته الكيميائي ولا يتأكسد إلا في الرطوبة الزائـــدة والحـرارة العالية. وهو قابل للطرق والطي والسحب واللحام. يلحم إما باللهب وإما كهربائياً بمسارى من البرونز الفوسفوري أو من الفحم.

تصنع من النحاس المصفى أسلاك رفيعة، بالـــسحب الـــساخن فـــي آليـــات خاصـــة حتى 0,1mm يصبح النحاس بعد السحب قاسياً نسبياً ويكتسب سقاية لذا تُعـــاد إليه خواصـــه بالتخمير في جو خالٍ من الهواء منعاً لتأكسده. يستعمل النحاس القاسي في الأماكن التي تتطلب صلابة ميكانيكية عالية كصفائح مبدلات آلات التيار المستمر (كما ســـنرى)، كمـــا يـــستعمل النحاس اللين في نواقل وملفات الآلات الكهربائية.

ب – الألمنيـوم:

وهو من أكثر المواد الناقلة استعمالاً بعد النحاس. يُـستخرج الألمنيـوم مـن فلـزات البوكسيت $(Al_2O_3 + 2H_2O)$ Bauxit، بعد تنقيتها بطريقة كيميائية، ونحصل عليـه نقيـاً منصهراً بطريقة التحليل الكهربائي بعد إضافة مادة الكريوليـت Gryolitلتخفـيض درجـة انصهار. وزن الألمنيوم النوعي ($2,7\,g/cm^3$)، ودرجة انصهاره (650^o)، وأكبر مقاومـة نوعية مسموح له بها ($0,0295.10^{-6}\,\Omega.mm^2/m$) وهي أكبر من النحاس بـــ (1,7) مرة.

يمتـاز الألمنيوم بخفـة وزنه ورداءة صفاته الميكانيكية، لذا يستعمل فقط فـي صـنع نواقل خفيفة في الأقسام الدائرة للمنوبات والآلات الكهربائية الأخرى.

يتأكسد سطح الألمنيوم بسرعة وتظهر علية طبقة من الأوكسيد ذي المقاومة المرتفعة ، لذا يصعب لحمه أو وصله بالقصدير.

ج- الفحـم:

تتغذى ملفات الدائر في الآلات الكهربائيـة، أو يؤخذ منهـا التيـار عبـر مـسفرات مصنوعة من الفحم. يستعمل الفحـم لصنع مـسفرات الآلات الكهربائيـة لحـسن صفاتـه الكهربائيـة و الميكانيكية الملائمة لهـذا الغرض. إذ أن الفحم يمتاز بارتفاع درجة انصهاره، و مرونته الجيـدة، وثباته الكيميائي و حـسن ناقليتـه للكهربـاء و الحـرارة و بـصلابته الميكانيكيـة.

يحضر الفحم من فلـزاته الطبيعية أو الصنعية بشكل بودرة و يمـزج مـع الـصمغ العضوي ثم تكبس الخليطة تحت ضغوط عالية ($500 \div 3000\ kg/cm^2$) و يشوى النـاتج تحت حرارة عالية ($1400 \div 2500\ C^o$) نميـز عـدة أنواع للفحم المـستعمل فـي الآلات الكهربائية و ذلك حسب نوعية فلزات الفحم الممزوجة و حسب ارتفـاع ضـغط المكـابس و طريقة الشوي فهنالك:

١- **الفحم القاسـي:** يصنع من بودرة الكوكس النفطي أو من الغبـار الفحمي، ويمـزج مـع الصموغ ويجفف ثـم يُطحـن ثانيـة ويكبس في مكابس خاصة وبأشكال متنوعـة. تـشوى

المادة الناتجة في أفران تحت حرارة ($1400\ C^o$) لتكتسب الصلابة الميكانيكية اللازمة بعد إحاطتها بغبار الفحم لحمايتها من الاحتراق، تدوم عملية الشوي والتبريد مدة ثلاثة أسابيع.

يستعمل الفحم القاسي في صنع مسفرات الآلات الكهربائية ذات الاستطاعة الصغيرة.

٢- **الفحم الليـن:** نحصل على هذا الفحم بعد شوي الفحم القاسي مرة ثانية تحت حرارة عالية($2500\ C^o$) حتى يصبح لينـاً، تدوم هذه العملية بضعة أيام فقط.

يستعمل الفحم الليـن في صنع مسفرات الآلات الكهربائية ذات الاستطاعة الكبيرة.

٣- **الفحم الغرافيتي:** يصنع بطريقة متشابهة ولكن من بودرة الغرافيت الطبيعي. يستعمل هذا الفحم في صنع مسفرات الآلات الكهربائية عالية الاستطاعة وعالية التيار.

٤- **الفحم المعدني:** تُخلط بودرة الفحم مع برادة النحاس للإقلال من مقاومته الداخلية ثم تكبس الخليطة تحت حرارة معينة. ويستعمل الفحم المعدني في صنع مسفرات الآلات الكهربائية منخفضة التوتر عالية التيار.

١-٥-٢- المواد العازلة المستعملة في الآلات الكهربائية:

تُعزل أسلاك ملفات الآلات الكهربائية عن بعضها، كما تُعزل الملفات عن بعضها البعض وعن جسم الآلة.

يجب أن تملك المواد العازلة جهد انهيار عال، ناقلية حرارية عالية، متانة ميكانيكية عالية، ضياعات منخفضة، مقاومة عالية ضد الاهتزاز. تتناقص هذه الصفات بعد فترة من الزمن لكن سرعة انخفاضها تعتمد بشكل كبير على درجة الحرارة الأعظمية التي يُمكن تحملها لفترة طويلة من الزمن. فكل عازل يتحمل درجة حرارة أعظمية خاصة به، ويفقد العازل صفاته العازلة إذا تخطينا هذه الدرجة العظمى. ويقال عندئذ إن العازل قد انهار.

تصنف المواد العازلة للآلات الكهربائية الى عدة أصناف كما هو مبين في الجدول رقم (١-١) :

الجدول (١-١): تصنيف المواد العازلة

صنف العازلية	Y	A	E	B	F	H	C
الدرجة المئويـــة القصوى، [C^o]	90	105	120	130	155	180	أعلى من 180

١- عـــازل الصنف Y: يتركب من خيوط قطنية وأقمشة وورق ومـــواد سيليلوزية ليفيـــة (عضوية) أو حرير غير مشربة وغيـــر مغموسة في سائل عازل.

- أقصى درجة حرارة لمـــواد هـــذا النوع هي C^o 90.

٢- عـــازل الصنف A: نفـــس مـــواد صنف العازل Y ولكنها مشربة أو مغموســـة فـــي سائل عـــازل.

- أقصى درجة حرارة لهـــذا النوع C^o 105.

٣- عـــازل صنفE: رقائق عضوية تركيبية ومـــواد أخرى لها نفس الاستقرار الحراري.

- أقصى درجة حرارة C^o 120.

٤ - عـــازل صنفB: مـــواد ذات أساس من الميكاMica والأميـــنط أو ذات أســـاس مـــن الزجاج أو النسيج الليفي وذات عنصر تماسك عضوي.

- أقصى درجة حرارة C^o 130.

٥ - عـــازل صنف F: مـــواد ذات أساس من الميكا والأمينط، أو ذات أساس من الزجـــاج أو النسيج الليفي متماسكة مع مـــواد صناعية ومشربة بمـــواد عضوية.

- أقصى درجة حـــرارة C^o 155.

٦ - عـــازل صنف H: مـــواد ذات أساس من الميكا والأمينط أو ذات أساس من الزجاج أو النسيج الليفي مع مـــواد تماسك سيلكونيـــة ومشربة بمواد عضوية.

- أقصى درجة حـــرارة C^o 180.

٧ - عـــازل صنف C: مـــواد ذات أساس ميكا أو مـــواد السيراميك أو زجـــاج أو كوارتز تستعمل من دون أو مع قـــوة تماسك غيـــر عضوية.

٢-٢-٢- منحني التمغنط و الاشباع المغناطيسي :

يُعرَّف منحني التمغنط (أو المغنطة) Magnetization Curve على أنه العلاقة التي تُعطي تحولات كثافة السيالة المغناطيسية B (التحريض المغناطيسي) بدلالة شدة المجال المغناطيسي H وهذه العلاقة غير ثابتة و تختلف حسب المادة المغناطيسية حيث لكل مادة مغناطيسية منحني خاص بها يسمى منحني التمغنط أو منحني (H – B) وهو من المنحنيات الهامة في الآلات الكهربائية و يُعبر عنه بالعلاقة $B = \mu H$.

حيث:

$\mu = \mu_0 \mu_r$: عامل النفاذ المغناطيسي.

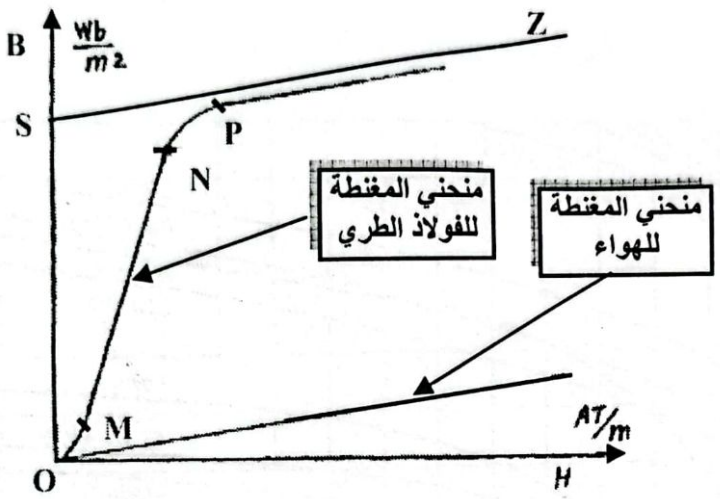
μ_r : عامل النفاذ المغناطيسي النسبي للمادة.

$\mu_o = 4\pi.10^{-7} \frac{H}{m}$: عامل النفاذ المغناطيسي في الفراغ.

تكون هذه العلاقة في المواد غير المغناطيسية خطية تقريباً أما في المواد المغناطيسية فإن العلاقة بين B و H علاقة غير خطية و تتبع قانوناً معقداً (غير بسيط).

لرسم هذا المنحني ننطلق من الشكل (٢-٢) بعد فرض أن النواة لا تحتفظ في البدء بأية خواص مغناطيسية. نغلق الدارة الكهربائية التي تسمح بمرور التيار I على أن تؤخذ قراءة المقياسيين ثم نرفع شدة التيار إلى قيمة أعلى دون أن نجعلها تتناقص مطلقاً أثناء ذلك. و هكذا

نحصل على عـــدة قيم متوافقة لكل من Φ و I و بالتالي لـــ B و H، انطلاقاً من هـــذه النتائج نقوم برسم B كتابع لـــ H فنحصل على المنحني المبين في الشكل (٢-٣) و ذلك فـــي حالـــة كون النواة مصنوعة من الفولاذ الطري.



الشكل (٢-٣): منحني التمغنط للفولاذ الطري

اذا تفحصنا هذا المنحي نلاحظ:

- ◄ أن تحولات B مع H تتبع قانوناً معقداً (غير بسيط).
- ◄ يمكن تقسيم المنحني B (H) إلى ثلاثة أقسام هي:

- قسم صغير على شكل قطع مكافئ OM، و ليس لهذا الجزء أهمية كبيـــرة لأنه ينتهي من أجل حقل مغناطيسي ضعيف جداً.
- قسم ثاني يمكن اعتباره عملياً قسم خطي MN، في هذا القـــسم تكـــون B متناسبة تقريبا بشكل طـــردي مع H.
- قسم ثالث و الذي يدعى بركبة المنحني NP.
- قسم رابع يأخذ فيه المنحني شكلاً مقارباً مع المستقيم SZ، ويكون قـــانون تزايد B مطابقـــاً في هـــذه المرحلة لتزايده في الفـــراغ فيتصرف الفولاذ

٢-٣- قـــوانين التحريض و القـــوى الكهرومغناطيسية:

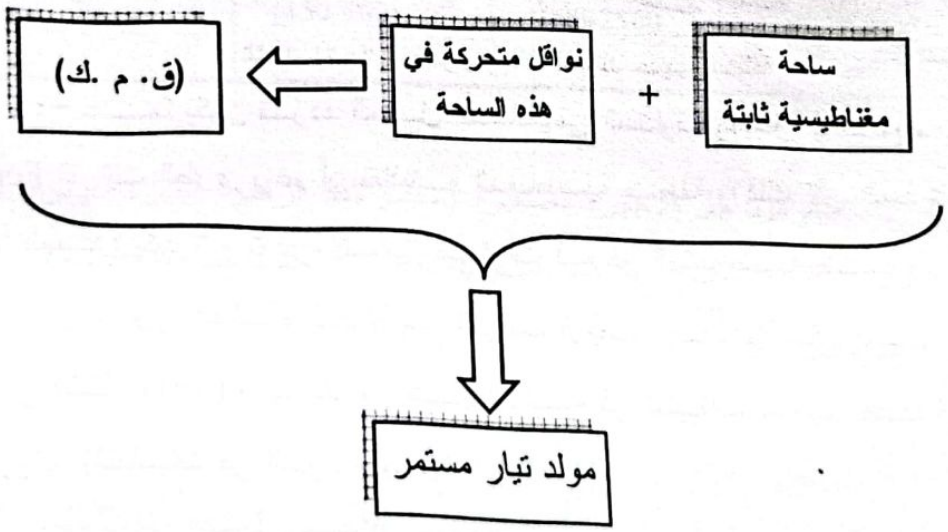
Laws of Electromagnetic Induction and Forces

٢-٣-١- قانـــون فـــرداي: Faraday's law

يُحـــدد هذا القـــانون ظاهرتين اساسيتين في التحريض الكهرومغناطيسي، مختلفتين في الشكل و متفقتين في المضمون.

- الظاهرة الأولى :

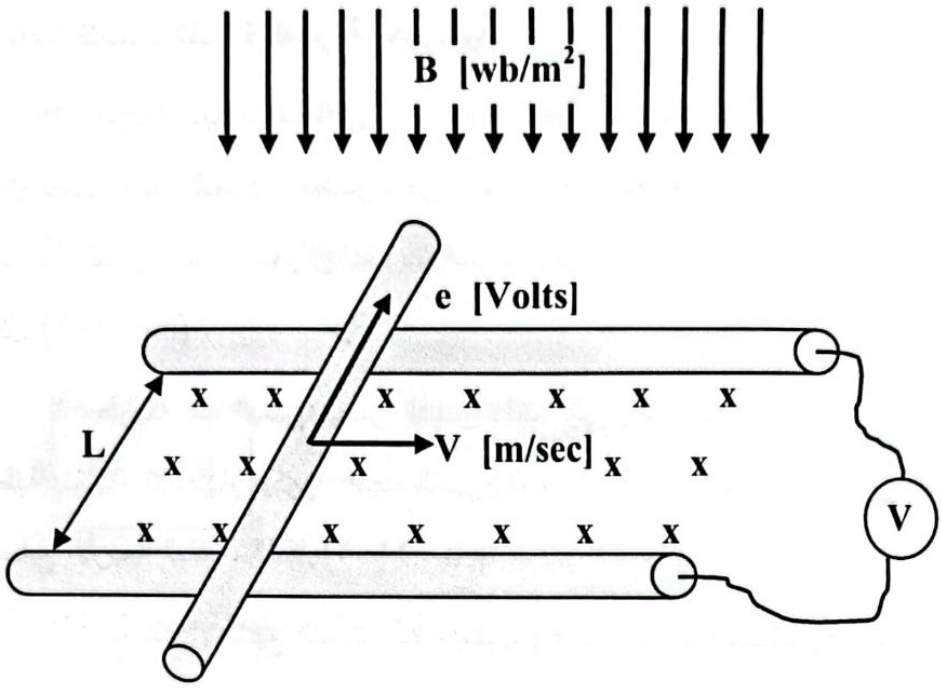
تعتمد هذه الظاهرة على توليد قوة محركة كهربائية (ق. م .ك) في نواقـــل متحركـــة في ساحة مغناطيسية ثابتة، تسمى هذه القوة بالقوة المحركة الكهربائية الحركية، و هـــذا هـــو مبدأ عمل مولدات التيار المستمر الموضّح في الشكل (٢-٩).



الشكل (٢-٩): مبدأ عمل مولدات التيار المستمر

لنفرض أنه لدينا سكتين معدنيتين ناقلتين متوازيتين متوضعتين ضمن ساحة مغناطيسية ثابتة تحريضها[Wb/m^2] B كما هو موضّح بالشكل (٢- ١٠). و كان لدينا ناقل كهربـــائي يتحرك بسرعة خطية[m/sec] V على هاتين السكتين. تتولد في هذا الناقـــل قـــوة محركـــة كهربائيـــة (ق.م.ك) e ، حسب قانـــون فـــرداي، تعطى بالعلاقـــة الأتيـــة:

$$\bar{e} = \int_0^l (\overline{V} \times \overline{B}).dL \qquad (٢-١)$$



الشكل (٢-١٠): تجربة توضح قانون فرداي

حيث :

L: طول الناقل الفعّال الموجود ضمن الساحة المغناطيسية ويقاس بـــ [m].

dL : جزء صغير من طول الناقل.

فاذا كانت سرعة الناقل منتظمة و الساحة المغناطيسية متجانسة على طول الناقل، تكون قيمة القوة المحرّكة الكهربائية e :

$$e = B.L.V.\sin\alpha \qquad [V] \qquad (٢-٢)$$

حيث α هي الزاوية بين شعاع التحريض وشعاع السرعة.

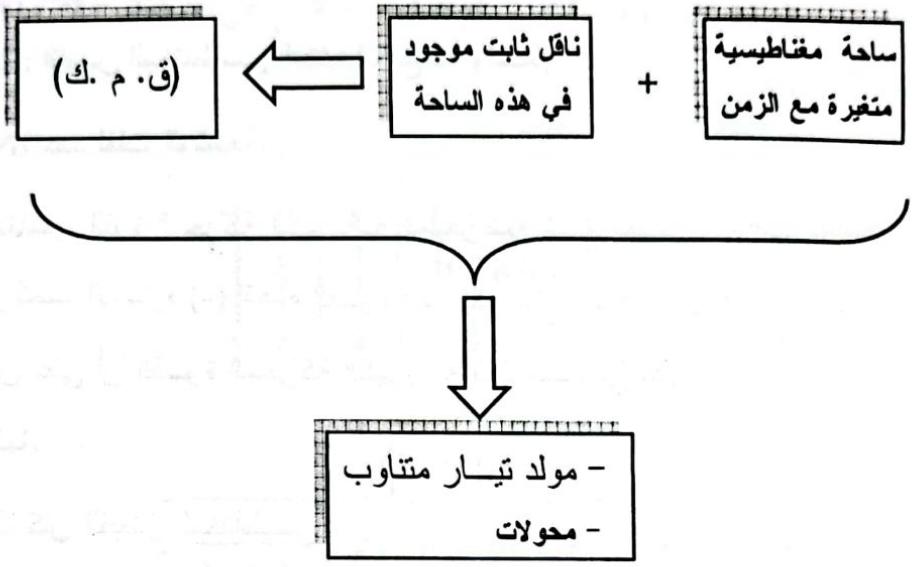
عند تعامد الشعاعين المذكورين تصبح علاقة القوة المحرّكة الكهربائية مساوية إلى:

$$e = B.L.V \qquad [V] \qquad (٢-٣)$$

<u>ملاحظـــة:</u> تدل اشارة X إلى أن شعاع التحريض B يدخل في مستوي الورقة.

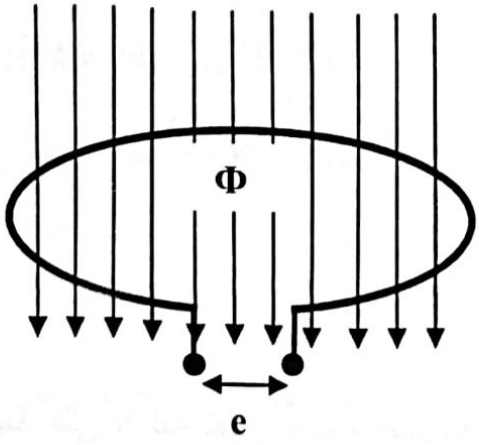
- الظاهرة الثانيـــة :

تعتمد هذه الظاهرة على توليد قـــوة محركة كهربائية (ق. م .ك) فـــي ناقـــل ثابـــت موجود في ساحة مغناطيسية متغيرة مع الزمن، وتسمى هذه القوة بالقوة المحركة الكهربائيـــة التحريضية، و هذا هو مبدأ عمل آلات التيار المتناوب(المولدات و المحولات) الموضّح فـــي الشكل (٢-١٢).



الشكل (٢-١٢): مبدأ عمل مولدات التيار المتناوب و المحولات

اذا كان لدينا ناقل (أو لفة) موجود ضمن ساحة مغناطيسية متغيرة مع الزمن، كما في الشكل (٢-١٣)، ستتحرض قـــوة محرّكة كهربائية في هـــذا الناقل تعطى بالعلاقة (٢-٤).



الشكل (٢-١٣): ساحة مغناطيسية متغيرة مع الزمن تشتبك مع ناقل من لفة واحدة

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad (٤-٢)$$

إذا كان لدينا N لفة تصبح العلاقة (٢-٤) بالشكل التالي :

$$e = -N\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt} \qquad (٥-٢)$$

حيث:

ψ: الفيض المغناطيسي الكلي المتشابك مع الوشيعة.

Φ: الفيض المغناطيسي المتشابك مع لفة واحدة.

N: عدد لفات الوشيعة.

تتناسب القوة المحرّكة الكهربائية المتحرّضة مـــع تغيـــر الفيض المغناطيسي بالنسـ
للزمن، و تحدد الاشارة (-) اتجاه القـــوة المحرّكة الكهربائية حسب قاعدة لينـــز enz's Law
التي تنص على أن القـــوة المحرّكة الكهربائية المتولـــدة في ناقل تُعاكس السبب الـــــذى أد
إلى نشوئها.

اذا كان الفيض المغناطيسي:

$$\Phi = \Phi_{max} . \cos \omega t \qquad (٦-٢)$$

فإن:

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\omega.\Phi_{max} . \sin \omega t \qquad (٧-٢)$$

حيث ω هي السرعة الزاوية للسيالة المغناطيسية و تقدر بـــ [rad/sec].

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega.\Phi_{max} . \sin \omega t = E_{max} . \sin \omega t \qquad (٨-٢)$$

$$E_{max} = \omega.\Phi_{max} = 2\pi f.\Phi_{max} = \sqrt{2}E_{rms} \qquad (٩-٢)$$

$$E_{rms} = 4,44 . f.\Phi_{max} \qquad (١٠-٢)$$

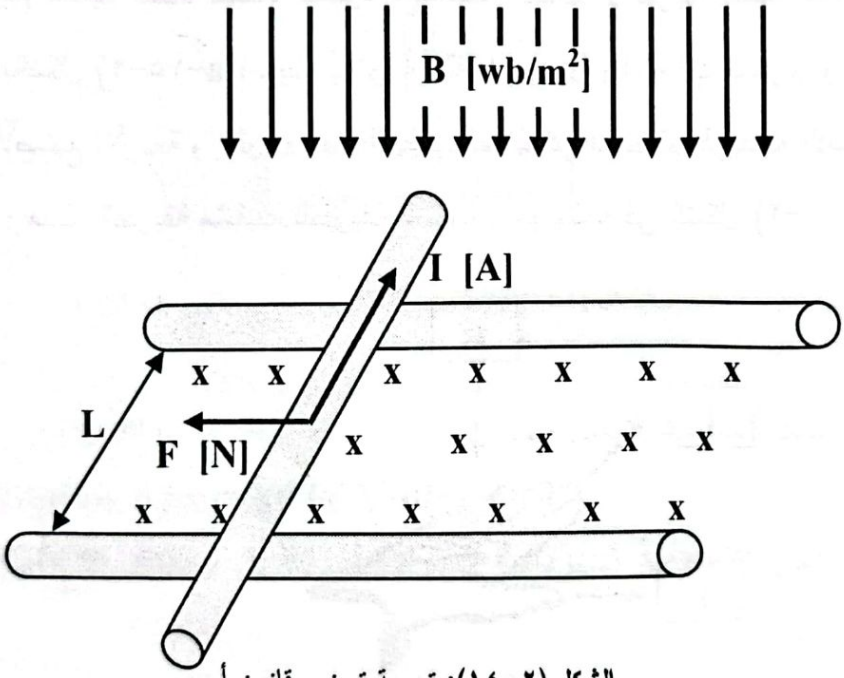
و اذا احتوت الوشيعة على N لفة تكون القـــوة المحرّكة الكهربائية الكلية المتحرّضة هي:

$$E = N.E_{rms} = 4,44 . N.f.\Phi_{max} \qquad (١١-٢)$$

حيث f هو تردد السيالة المغناطيسية و يقدر بـ [Hz] و E_{rms} هي القيمة الفعّالـة (المنتجـة) للقـوة المحرّكة الكهربائية.

٢-٣-٢- قانـون أمبيـر: Ampere's law

تـؤثر على سلك ناقل يمر فيه تيار I [A] و موجود في سـاحة مغناطيـسية ثابتـة تحريضـها B [Wb/m^2] قـوة ميكانيكيـة، كما هو موضّح في الـشكل (٢-١٤)، تُعطـى بالعلاقـة (٢-١٢).



الشكل (٢-١٤): تجربة توضح قانون أمبير

$$\overline{F} = \int_0^L (\overline{I} \times \overline{B}) dL \qquad (٢-١٢)$$

حيث:

dL : جزء من طول السلك الناقل الذي يُطابق اتجاهه اتجاه التيار الواقع تحـت تـأثير الساحة المغناطيسية الثابتة.

اذا كانت قيمة التيار ثابتـة و الساحة المغناطيسية متجانسة على طول السلك الناقل تـصبح قيمة هذه القوة مساوية إلى:

$$F = B.I.L.Sin\gamma \quad [N] \qquad (١٣-٢)$$

حيث γ هي الزاوية بين شعاعي التحريض المغناطيسي والتيـــار الكهربائي.

عند تعـــامد الشعاعين المذكـــورين تصبح هذه القـــوة الميكانيكية مساوية إلى:

$$F = B.I.L \quad [N] \qquad (١٤-٢)$$

تتناسب القوة الميكانيكية المؤثرة على السلك الناقل طرداً مع كل مـــن طولـــه الفعّـال (الواقع ضمن المجال المغناطيسي)، التيار الكهربائي المار فيه و التحريض المغناطيـــسي للساحة المؤثرة على السلك.

آلـــة التيـــار المستمـــر(البنيـــة – مبـــدأ العمـــل)

D.C Machine (Morphology -Principles)

٣-١- مقدمـــة: Introduction

تستخدام آلات التيـــار المستمر، كمحرّكات و كمولدات، على نطاق واسع و في مختلف المجالات حيث تُستخدام بشكل كبير من أجل إدارة الآلات الكهربائية المختلفة المستعملة فـــي صناعة التعـــدين (آلات السحب و الطرق، السيور المتحركة و....الخ) و في وسائط النقـــل (عربات الجـــر الكهربائيـــة، القطارات، البواخر و السيارات الكهربائية) و في آلات الرفع و الحفر (الروافـــع، عربات النقـــل المستخدمة في المنـــاجم و...) و فـــي الـــسفن البحريـــة و النهـــرية و في صناعة معالجـــة المعادن و الصناعات الورقية و النسيجية و وسائل الطباعـــة و غيرها. كما تُستخدم المحرّكات الصغيرة في الكثير من جُمل التحكم.

تتميـــز محرّكات التيـــار المستمر ببنية أعقد و كلفة أكبـــر بالمقارنة مع مثيلاتها مـــن المحرّكات التحريضية، بيـــد أن الاستخدام الواسع لجُمـــل القيـــــادة الكهربائيـــة الآليـــــة و المبدلات الثايرستورية- التي تسمح بتغذية محرّكات التيـــار المستمر بتوتـــر ذي قيمة قابلـــة للتنظيم يؤخذ من شبكة التيـــار المتناوب- أدى إلى الانتشار الواسع لهـــذه المحرّكات.

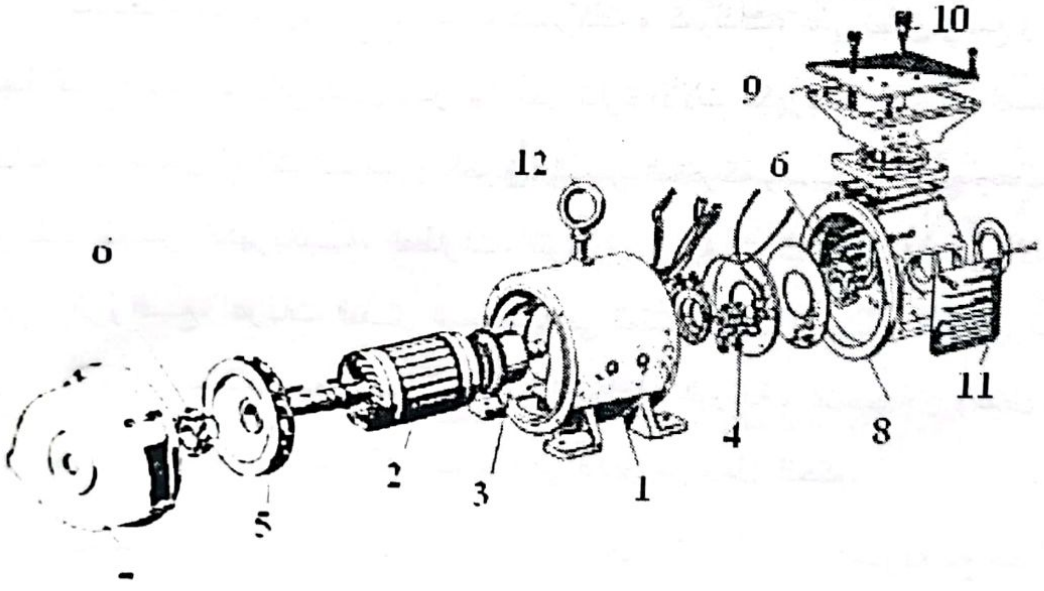
أما بالنسبة لمولدات التيـــار المستمر فقـــد كانت في السابق تُستخدم على نطاق واســـع كمنابع لتغذية محرّكات التيـــار المستمر المستخدمة في المنشآت الثابتـــة و المتنقلة، فضلاً عن استخدامها كمنابع للتيـــار المستمر اللازمة لشحن المدّخرات الكهربائية و تغذيـــة الأحـــواض

الغلفانيــة و منشآت التحليل الكهربائي و تزويد مختلف عناصر الاستهلاك بالطاقة الكهربائية في السيارات و الطائرات و القطارات الكهربائية المستخدمة لنقــل المسافرين و البــضائع و غيرها. بيــد أن استخدام هذه المولــدات أخذ يتراجع في الأونــة الأخيــرة لصالح مولــدات التيار المتناوب المزوَّدة بوحدات تقويم التيــار و ذلك بسبب بعــض عيــوب آلات التيــار المستمر التي تَكمن في وجود المجمّع و المسفرات (احتكاك ميكانيكي) الذي يتطلــب صــيانة دورية دقيقة أثناء الاستثمار مما يؤدي إلى خفض درجة موثوقية هذه الآلات، هذا بالاضــافة إلى تعقيد تركيبها الذي ينعكس ارتفاعاً نسبياً في كلفتها.

٣-٢- بنيــة آلــة التيــار المستمــر:

Morphology of D.C Machine

تتكون آلة التيار المستمر، المبينة في الشكل (٣-١)، بشكل رئــيس مــن: الثابــت أو المُحرّض – الــدوّار أوالمُتحرّض- المجمّع أو المُبــدل- الفحمــات أو المــسفرات-الإطــار الخارجي- الفجوة أو الثغرة الهوائية.



الشكل (٣-١): بنيــة آلــة التيــار المستمــر

1-الثابت 2- الــدوّار 3- المجمّع 4- المسفرات و حاملات المسفرات

5- مروحة التهوية 6- كراسي التحميل (رولمانات) 7- غطاء الآلة (طرف نهاية المحور)

8- غطاء الآلة (طرف المجمّع) 9- غطاء علبة المرابط 10- المرابط

11- غطاء فتحة الفحص 12- حلقــة تعليــق

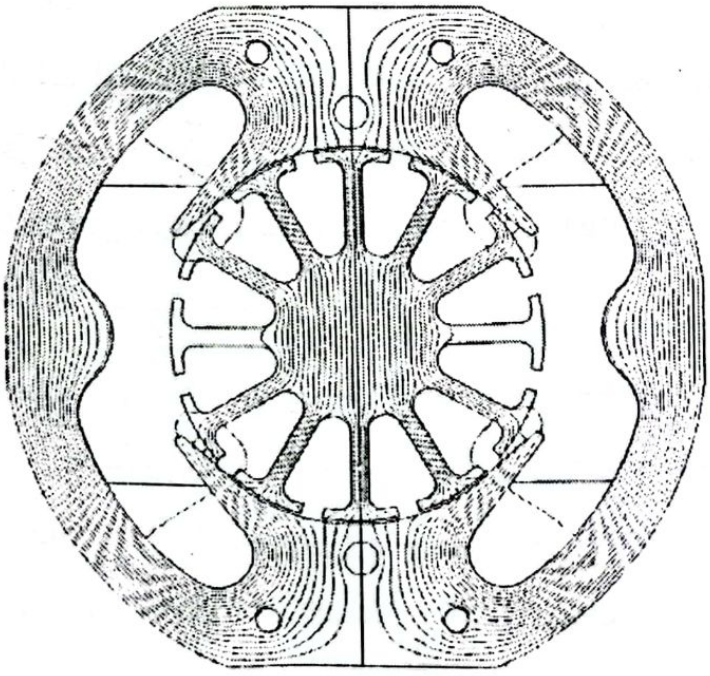
٣-٢-١- الثـــابت: Stator

يتألف الثابت من الأقسام التالية:

- جسم الثابت (الإطار أو الهيكل).
- الأقطاب الرئيسية.
- الأقطاب الإضافية (أقطاب التبديل أو الأقطاب الداخلية).

٣-٢-١-١- جسم الثابت (الإطـــار أو الهيكل):

يُعـــد جسم الثابت عنصر تصميمي أساسي حيث يؤمن الصلابة و المتانة الميكانيكيـــة الضرورية لكامل الثابت. يُصنع جسم الثابت، الذي يتمتع بمتانة ميكانيكيـــة كافيـــة و نفوذيـــة مغناطيسية عاليـــة، على شكل اسطوانة مفـــرّغة (انبـــوب) من الفـــولاذ أو الحـــديد الـــصب بوصلات أو من دونها و ذلك حسب استطاعـــة الآلـــة. و تُثبت على سطح الهيكـــل الـــداخلي الأقطاب الرئيسية و الإضافية، كما يتـــم من خلاله إكمال أو اغلاق دارة السيالة المغناطيـــسية في الآلـــة، انظـــر الشكل (٣-٢).

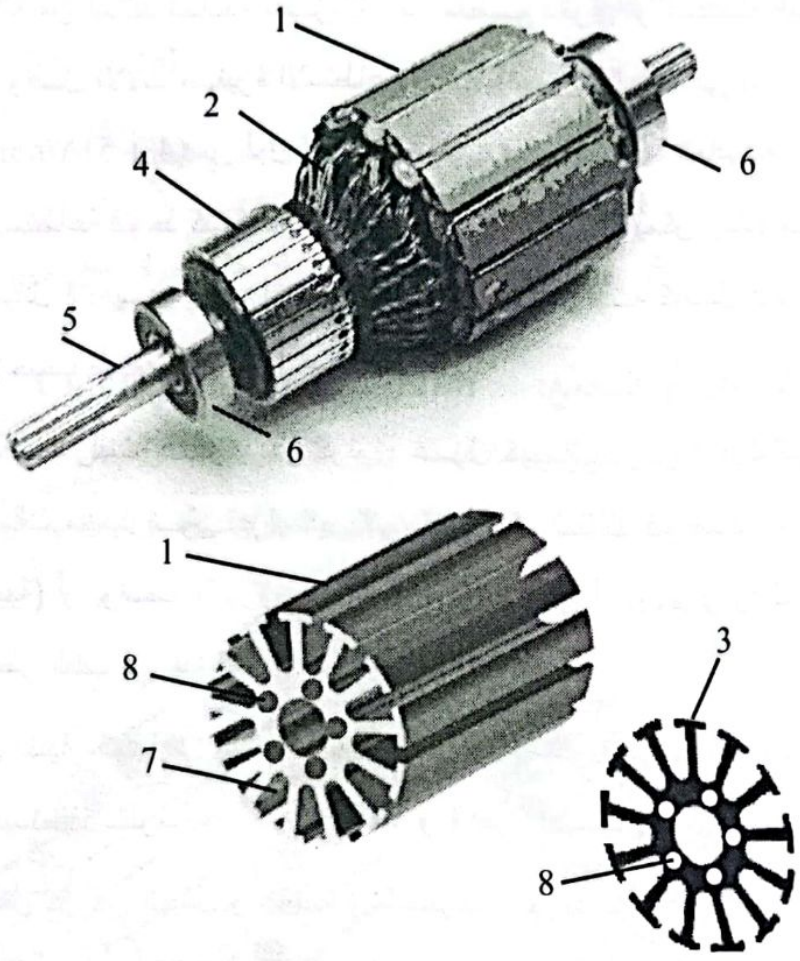


الشكل (٣-٢): مسار السيالة المغناطيسية داخل آلة تيار مستمر

(تحليل بمساعدة الـــ Finite Element)

٣-٢-٢- الـــدوّار (المتحرّض): Rotor (Armature)

يُبين الشكل (٣-٥) نموذجاً حقيقياً لدوّار آلة تيار مـــستمر باجزائـــه المختلفـــة (قلـــب المتحرّض – ملف المتحرّض- المجمّع- محور الدوران). يتم تصنيع قلب المتحـــرّض علـــى شكل اسطوانة من رزمة من صفائح الفولاذ الكهربائي لا تتجاوز سماكتها (0,5)mm مكبوسة بالاتجاه المحوري للآلة و متوضّعـــة مباشرة على جذع الآلـــة (محور الدوران).



الشكل (٣-٥): دوّار آلة تيار مستمر

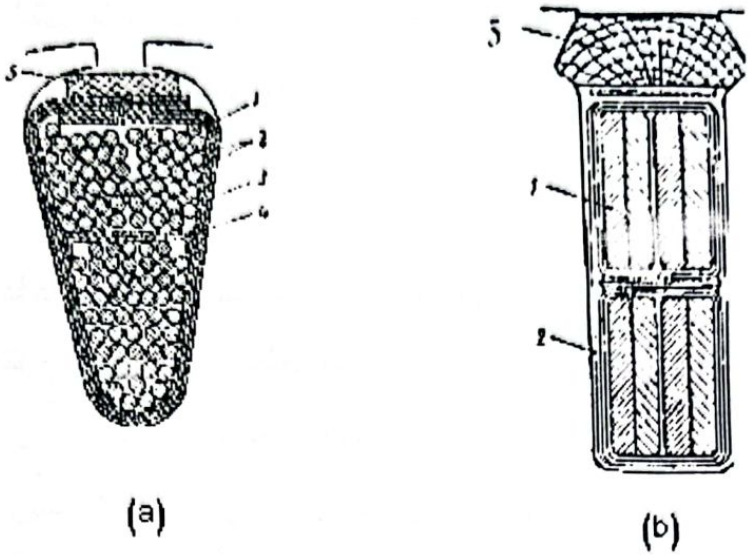
1-قلب المتحرّض 2- ملف المتحرّض 3- صفيحة فولاذية 4- المجمّع
5- محور الدوران 6- رولمانات 7 - مجاري (شقوق) 8- فتحات تهوية

تُعزل هذه الصفائح عن بعضها البعض بطبقة رقيقة من الورنيش أو بطبقة أكسدة تشكل على سطح المعدن سماكة (0,05 ÷ 0,03)mm أو بورق عازل و ذلك من أجل انقاص التيارات الاعصارية التي تتشكل في القلب عند عمل الآلة. غالباً ما يتم صنع فتحات تهوية طولانية في هذه الصفائح من أجل تحسين مواصفات تبريد المتحرِّض. يوجد على السطح الخارجي لقلب المتحرِّض مجاري (شقوق) توضع فيها نواقل ملف المتحرِّض. يتألف ملف المتحرِّض من مجموعة من الوشائع مسبقة الصنع يتم تركيبها في مجاري قلب المتحرِّض. تلف الوشائع من أسلاك نحاسية معزولة ذات مقطع دائري أو مستطيلة الشكل، تصل كثافة التيار في نواقل الآلات صغيرة الاستطاعة ذات التهوية الجيدة إلى A/mm^2 (7) بينما لا تتجاوز A/mm^2(5 ÷ 4) من أجل الآلات الصغيرة ذات التهوية العادية أما في الآلات كبيرة الاستطاعة فتؤخذ كثافة التيار A/mm^2(5 ÷ 2,5) ويُمكن زيادة هذه الكثافة بتحسين وسائل التبريد. يتحدد اختيار عازلية الناقل و عازلية كامل الملف عن قلب المتحرِّض حسب طبيعة و ظروف عمل الآلة.

تتألف عازلية المجرى من كرتون عزل كهربائي و الورنيش و توضع بين طبقات الملف حشوات من كرتون عزل كهربائي. يتم تثبيت الملفات في المجاري بواسطة اسفين (أوتاد خشبية) أو بواسطة طوق معدني من سلك فولاذي أو برونزي و لكي لا يبرز الطوق يتم جعل قطر القلب في هذا المكان أقل بقليل.

يتم اختيار المجاري على شكل بيضوي نصف مغلق للآلات ذات الاستطاعات غير الكبيرة و مستطيلة مفتوحة للآلات المتوسطة و الكبيرة الاستطاعة، الشكل (٣-٦).

يُشكل كل من الهيكل و القطب و المتحرِّض أجزاء الدراة المغناطيسية، لآلة التيار المستمر، التي تنغلق خلالها السيالة المغناطيسية التي يولدها ملف التهييج. تُحضّر جميع هذه الأقسام من حديد يملك أفضل الخواص المغناطيسية من اجل انقاص المقاومة المغناطيسية على طريق هذا الفيض.



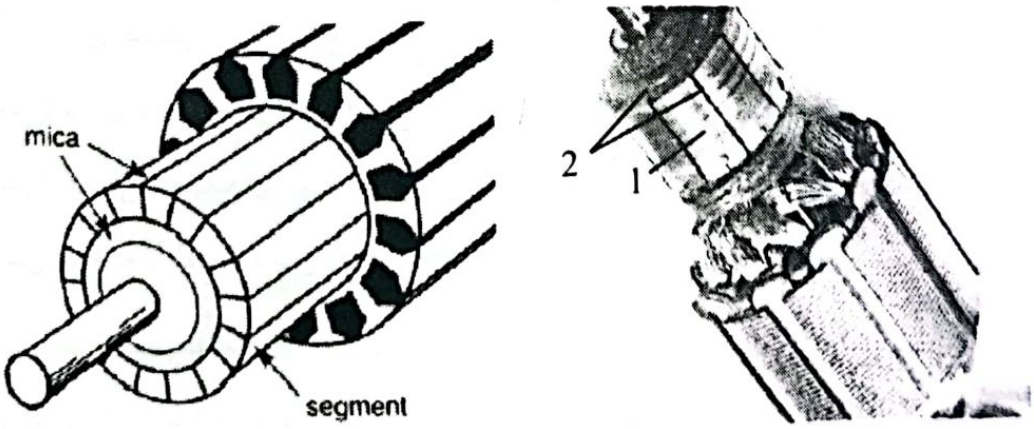
الشكل (٣-٦): أشكال المجاري في آلة التيار المستمر .

(a) بيضوي (b) مستطيل

1- ناقل 2- كرتون عازل 3- ورنيش 4- حشوات 4- إسفين

٣-٢-٣- المبـــدّل أو المجمّع: Commutator or Collector

يُطلق كلا التعبيرين حتى يومنا هـــذا على الاسطوانة المكونة من صفائح (نـــصلات) Segments مصنوعة من النحاس القاسي المدرفل والمعزولـــة عن بعضها الـــبعض وعـــن محـــور الـــدوران بطبقة من مادة الميكا Mica أو القـــار.



الشكل (٣-٧):

1 - صفيحة مجمّع 2- مادة عازلة (ميكا أو قار)

تكون سماكة طبقة المادة العازلة بين صفائح المجمّع (1 ÷ 0,6)mm. يتم جمع هذه الصفائح بحيث نحصل على شكل اسطوانة. توصل أطراف ملف المتحرّض إلى هذه الصفائح، انظر الشكل (٣-٧).

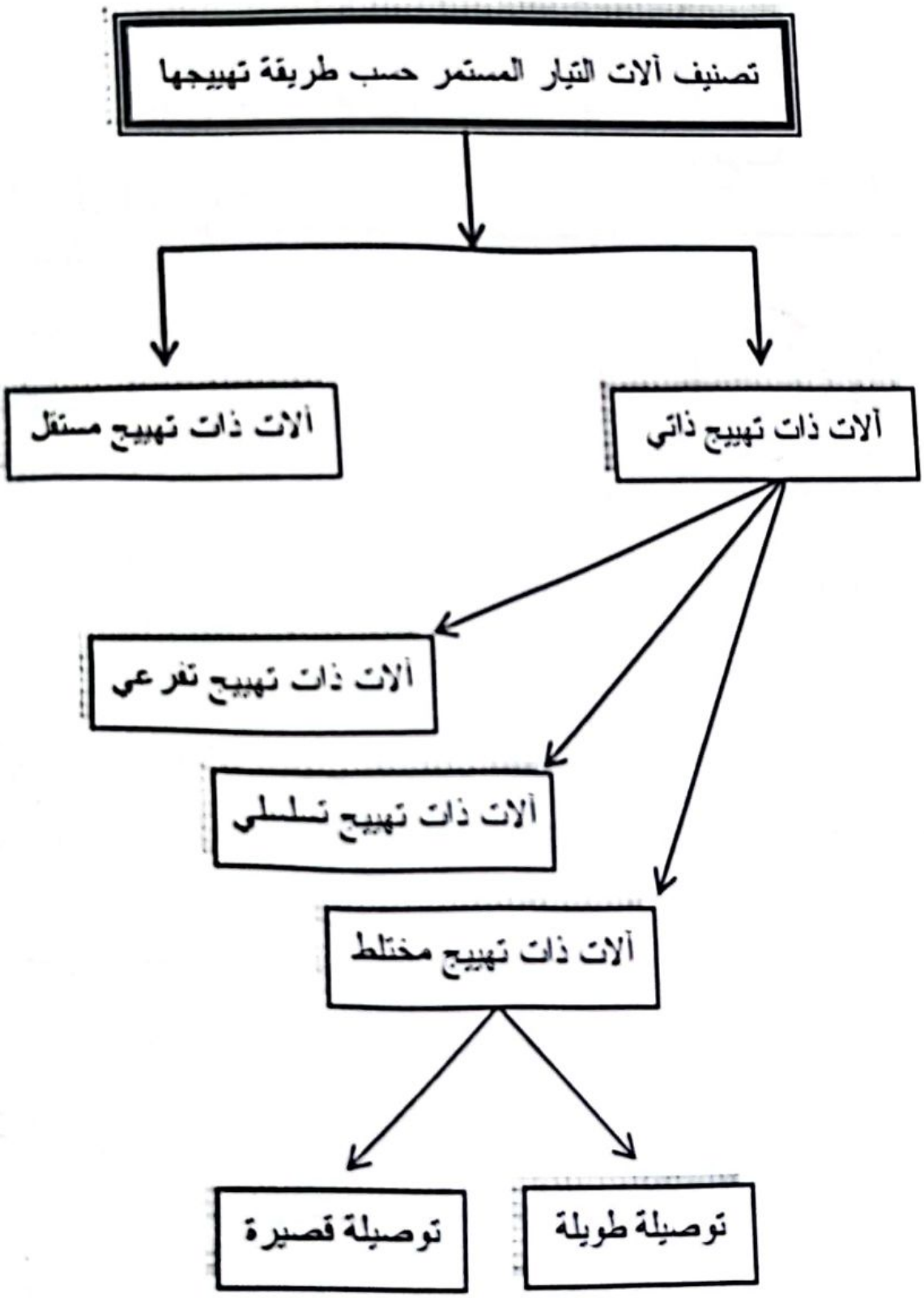
٣-٢-٤- الفحمات أو المسفرات: Brushes

المسفرة هي عبارة عن قطعة صلبة ذات جوانب قائمة مصنوعة من مسحوق الفحم الغرافيتي أو من فحم الكوك بطريقة المعالجة الحرارية و الضغط. توصل نهايتها الأولى إلى الأطراف الخارجية للآلة عن طريق كبل نحاسي مرن، أما النهاية الثانية فتمس و تنزلق على سطح المجمّع الاسطواني و بذلك فهي تقوم بنقل التيار الكهربائي، المُقدّم عبر المجمّع، من و إلى ملف المتحرّض.

تركّب المسفرة ضمن تجهيزة خاصة بها تدعى بجهاز المسفرة، الشكل (٣-٨)، و الذي يتكون بدوره بشكل أساسي من: المسفرة - حامل المسفرة - ماسك (أصابع المسفرة).

توضع المسفرات ضمن حوامل خاصة بها، و التي هي عبارة عن علبة تأخذ أشكال متعددة تختلف من آلة إلى أخرى و تكون معزولة عن موضع تركيبها، و تتلخص مهمة علبة المسفرات في تثبيت المسفرات والضغط عليها، بواسطة ساعد و نابض، بالقوة اللازمة بحيث تضمن التصاقها بالمجمّع. إن الضغط على المسفرة يجب أن يكون مضبوطا، بحيث يكون التلامس بين المسفرة و المجمّع متيناً و محكماً، لأن الضغط الكبير يمكن أن يسبب تآكل المسفرة خلال وقت قصير وارتفاع في درجة حرارة المجمّع كما أن الضغط الخفيف للمسفرات على المجمّع يؤدي إلى إطلاق شرار على المجمّع. تتراوح قوة الضغط المسموح بها بين المجمع والمسفرة بين $(1,5 \div 2,5)N/cm^2$.

يتم تثبيت حوامل المسفرات على أصابع اسطوانية أو موشورية الشكل التي تُثبّت بدورها إما إلى أغطية كراسي التحميل أو إلى عارضة تسمح عند الضرورة بفتل جملة المسفرات بأكملها حول أقطاب الآلة و يكون عدد الأصابع مساوياً الأقطاب و عند دوران المتحرّض تحافظ المسفرات على وضعية ثابتة بالنسبة لأقطاب الآلة.

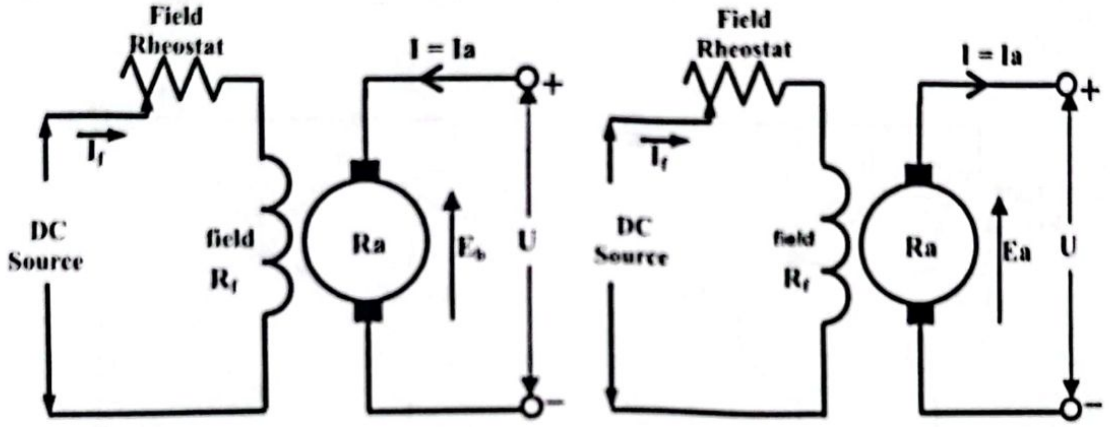


الشكل (٣-١٦): تصنيف آلات التيار المستمر حسب الطريقة المتبعة في تهييجها

١- آلات التيار المستمر ذات التهييج المستقل:

وفيها يتغذى ملف التهييج Field Winding من مصدر تيار مستمر مستقل أو خارجي (بطارية، مولدة أو مقوّم تيار متناوب) و بالتالي لا يوجد اتصال كهربائي بين ملفي المتحرّض و التهييج، الشكل (٣-١٧).

يكون تيار التهييج I_f في هذا النوع من الآلات مستقلاً عن تيار المتحرّض I_a وتتميز هذه الآلات بأن السيالة المغناطيسية الرئيسية فيها لا تعتمد على حمولة الآلة أي $\Phi = \alpha.I_f = Const$.



الشكل (٣-١٧): الدارات المكافئة لعمل آلة تيار مستمر ذات تهييج مستقل كمولد و كمحرك

من الشكل نجد أن العلاقة التي تربط بين الجهد على مرابط الآلة و القوة المحرّكة الكهربائية المتولدة في المتحرّض، و التي يُرمز لها بـ E_a في المولد و بـ E_b في المحرّك، هي:

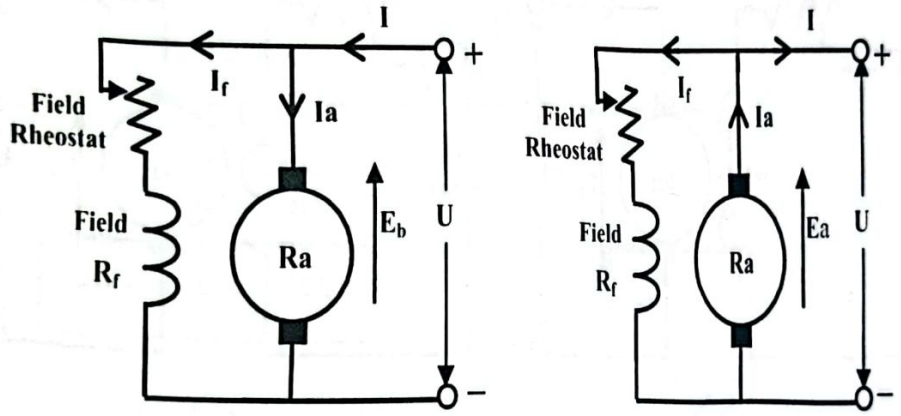
$$U = E_a - I_a.R_a$$
$$U = E_b + I_a.R_a \qquad (٣-٩)$$

٢- آلات التيار المستمر ذات التهييج الذاتي:

يتم فيها تغذية ملف التهييج من القوة المحرّكة الكهربائية المتحرّضة في ملفات المتحرّض (حالة المولد) أو من جهد الشبكة الذي يُغذي المتحرّض (حالة المحرّك). تُقسم هذه الآلات كما أسلفنا سابقاً إلى:

آ- آلات ذات تهييـج تفـرعي (آلات تفرعية):

يُوصل ملف التهييج كهربائياً، في هذا النوع من الآلات، على التفـرع مـع ملـف المتحرِّض، الشكل (٣-١٨). يُصمصم ملف تهييـج هـذه الآلات ليتحمل كامل الجهد المُطبَّق على الآلة لذلك تكون مقاومة ملف التهييج R_f كبيرة نسبيا، و يتم تحقيق ذلك بلف هذا الملـف بعـدد كبيـر مع اللفات المتكونة من سلك رفيع نسبياً. تتميز الآلات التفرعية بالثبات النـسبي للسيالة المغناطيسية الرئيسية وبقلة اعتمادها على ظروف تحميل الآلة حيث لا يتغير الفـيض المغناطيسي الرئيسي تغيـراً ملحوظا، عند توتـر ثابت و مقاومة ثابتة لملف التهيـيج، مـع تغيرات الحمل لـذلك نفترض بتقريب بسيط أن $\Phi = \alpha.I_f = Const$.



محرّك ذو تهييج تفرعي مولـد ذو تهييج تفرعي

الشكل (٣-١٨): الدارات المكافئة لعمل آلة تيار مستمر ذات تهييج تفرعي كمولد و كمحرّك

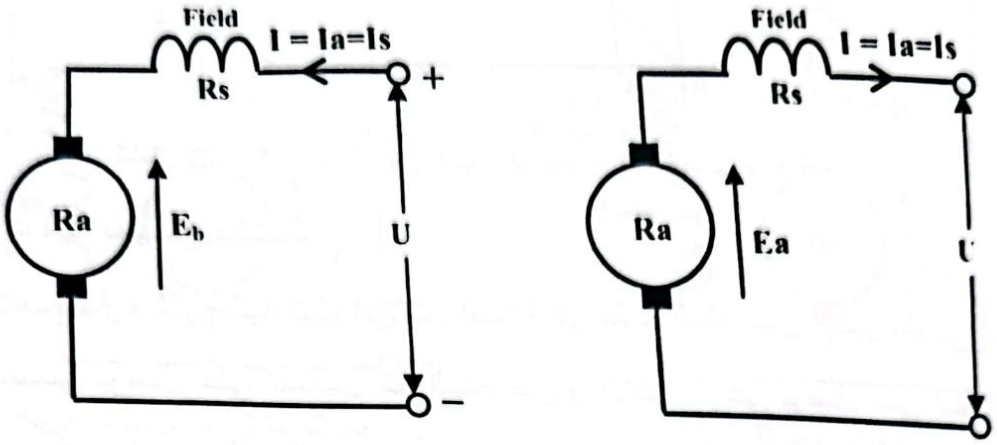
من الشكل نجد أن العلاقة التي تربط بين الجهد على مرابط الآلة و القـوة المحرّكـة الكهربائية المتولدة في المتحرِّض هي:

$$U = E_a - I_a.R_a \qquad (٣-١٠)$$
$$U = E_b + I_a.R_a$$

ب - آلات ذات تهييـج تسلسلي (آلات تسلسلية):

يُوصل ملف التهييـج في هـذه الآلات على التسلسل مع ملف المتحرِّض حيث يمـر كامل تيـار المتحرِّض I_a عبر ملف التهييـج كما هـو موضَّح بالشكل (٣-١٩).

يتم تصميصم هـــذا الملف بحيث يتحمل كامل تيـــار المتحرّض لذلك تكـــون مقاومـــة ملف التهييج R_s صغيرة نسبياً، و يتم تحقيق ذلك بلف هذا الملف بعـــدد قليـــل مـــن اللفـــات المتكونة من سلك بمقطع كبير نسبياً.



محرّك ذو تهييج تسلسلي

مولـــد ذو تهييج تسلسلي

الشكل (٣-١٩): الدارات المكافئة لعمل آلة تيار مستمر ذات تهييـــج تسلسلي كمولد و كمحرّك

بما أن تيـــار التهييج $I_s = I_a$ يكون كبير نسبياً فإنه وللحصول على القـــوة المحرّكة المغناطيسية اللازمة يكفي أن يحتوي ملف التهييج على عـــــدد قليـــل مـــن اللفـــات (أي أن المقاومة R_s تكون ذات قيمة صغيرة نسبياً).

تتصف هذه الآلات بأن السيالة المغناطيسية الرئيسية تابعة لتغير الحمل فـــي الآلـــــة وذلك نتيجة لتغيرات شدة تيـــار المتحرّض، والذي يُعـــد في نفس الوقت تيـــار التهييج، حيث تتناسب السيالة المغناطيسية الرئيسية Φ طرداً مع قيمة التيار المار في الآلة و ذلـــك ضـــمن مجال معين بالمنطقة الخطية من المنحني $\Phi = f(I)$. يُبين الـــشكل (٣-٢٠) العلاقـــة بـــين السيالة أو الفيض المغناطيسي و التيار I و هي علاقة غير خطية و تعد معقدة نسبياً، لذا نعتمد على القسم الخطي من المنحني و نفترض أن العلاقة خطية لتبسيط الحسابات.

من الشكل (٣-١٩) نجـــد أن العلاقة التي تربط بين الجهد على مرابط الآلة و القـــوة المحرّكة الكهربائية المتولدة في المتحرّض هي:

$$U = E_a - I_a.(R_a + R_s) \qquad (٣-١١)$$
$$U = E_b + I_a.(R_a + R_s)$$