لقد تمت تغذيـــه المحركين من منبع متناوب ثلاثي الطـــور ، حيث احتـــوى كل مـــن المحركين على ملفين مركّزين `1-1 و `2-2.

◄في عـــام ١٨٨٩ اختـــرع العالمان Dolivo و Dobrovolsky المحـــرك التحريـــضي الثلاثي الطور ذو الدوّار الملفوف، اضافة إلى عـــدة أجهـــزة و عناصـــر لنقـــل الطاقـــة الكهربائية الثلاثية الطـــور إلى مسافات بعيـــدة.

◄في عـــام ١٨٩٠ كانت الأشكال الأساسية للآلات الكهربائيـــة قـــد أُخترعت.

◄في عـــام ١٨٩١ انشاء أول محطة ثلاثية الطـــور تتالف من مولد باستطاعة 200Kw و من خطوط نقل ثلاثية الطـــور بتوتر 15Kv حيث تمت تغذية محـــرك تحريضي ثلاثي الطور باستطاعة 75Kw.

◄في عـــام ١٩٠١ تـــم اختراع الحديد السيليكوني و الـــذي مكّن استخدامه فـــي صـــناعة الآلات الكهربائية من تخفيض كتلـــة و أبعـــاد هـــذه الآلات دون أن تتـــأثر المميـــزات الاستثمارية.

١-٣- تصنيف الآلات الكهربائيـــة:

Classification of Electrical Machines

يوجد العديد من الطرق المتبعة لتصنيف الآلات الكهربائيـــة و التيّ تختلف فيما بينهـــا بالأساس المعتمد في عملية التصنيف، حيث تُصنف الآلات الكهربائيـــة حسب: الوظيفـــة- نـــوع التيـــار- الاستطاعـــة- ســـرعة الـــدوران، الـــشكل (١-٤).

١-٣-١- تصنيف الآلات الكهربائيـــة حسب الوظيفـــة:

يمكن تصنيف الآلات الكهربائيـــة حسب وظيفتها أو العمل المطلوب منها كمـــا يلي:

١- **المولّدات الكهربائيـــة:** و هي آلات تقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية المقدمة إليها إلـــى طاقة كهربائيـــة الشكل، (١-٥). تُستعمل هذه المولّدات في المحطات الكهربائيـــة حيث تُدار بواسطة عنفـــات بخاريـــة أو هيدروليكية، و في وســـائط النقـــل المختلفـــة (الـــسيارات، الطائرات، البواخر، القطارات،...) حيث تُدار بواســـطة محرّكـــات ديـــزل أو عنفـــات

Scanned by CamScanner

... تستخدم في بعض الحالات كمنابع للتغذية في محطات الاتصال و جُمل ... و أجهزة القياس.

٢- المحركات الكهربائية: و هي آلات تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية المقدمة إليها إلى طاقة ميكانيكية، الشكل (١-٦). تُستعمل هذه المحركات على نطاق واسع لتحريك ... الآلات و المعدات و آليات التشغيل و التجهيزات المستخدمة في الصناعة، و الزراعة، و النقل، و الاتصالات، و في المجالات العسكرية،...الخ.

٣- المحولات: و هي آلات تقوم بتغيير التوتر للطاقة الكهربائية المتناوبة، الشكل (١-٧)، و تستعمل بشكل واسع من أجل تغيير التوتر في أنظمة نقل و توزيع الطاقة الكهربائية (محولات القوى)، و في تجهيزات الاتصال و أجهزة التقويم، و في الحواسب و أجهزة الأتمتة، و في القياسات الكهربائية (محولات القياس).

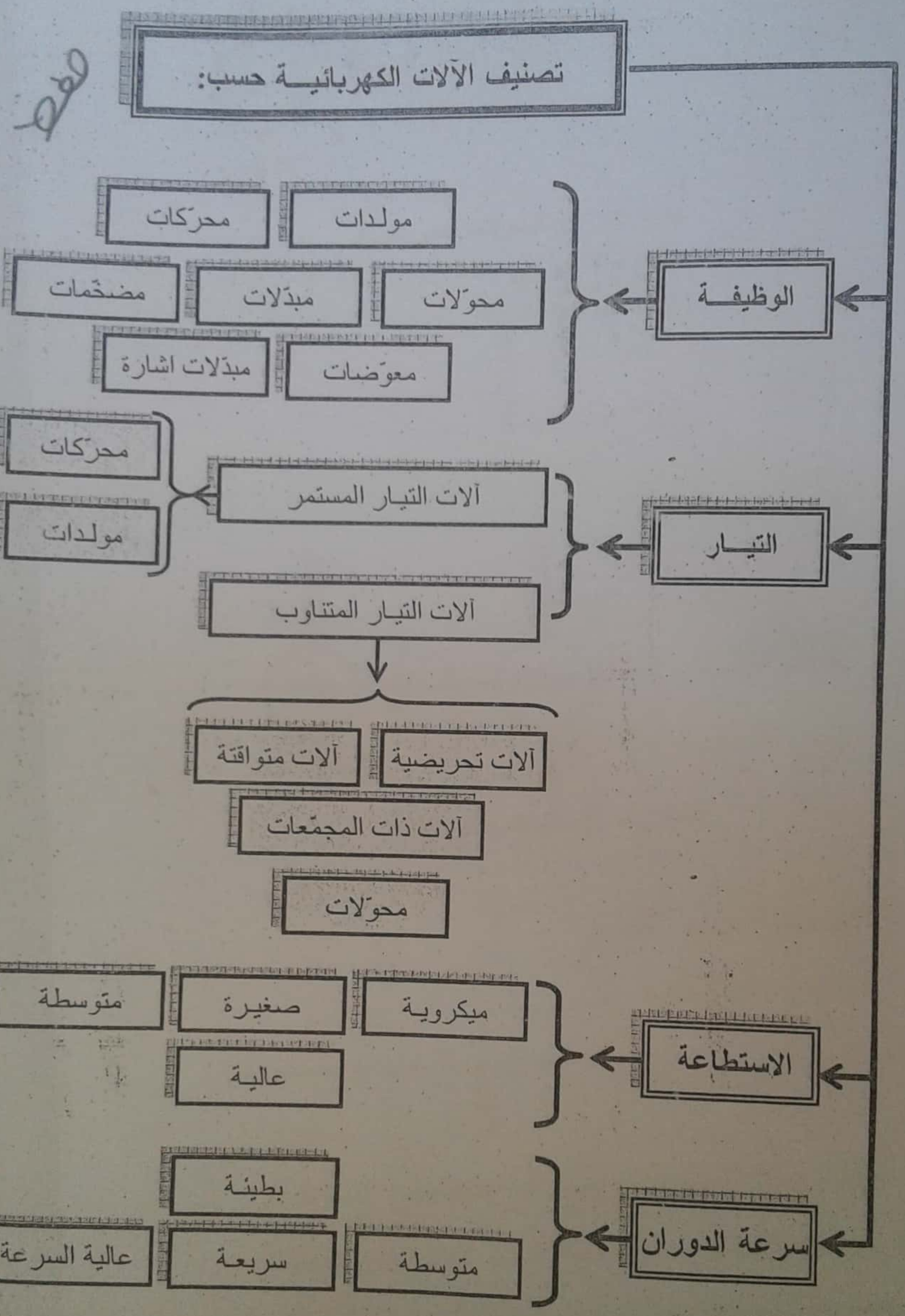
٤- المبدّلات الكهربائية: و هي آلات تقوم بتحويل التيار المتناوب إلى مستمر و بالعكس، كما تغيّر قيمة التيار المتناوب و المستمر و التردد و عدد الأطوار، الشكل (١-٨). تُستعمل المبدلات استعمالاً واسعاً في الصناعة و في النقل و في المجالات العسكرية. بيد أن دورها تراجع في السنوات الأخيرة لصالح مبدّلات أنصاف النواقل الستاتيكية.

٥- المعوّضات الكهربائية: تُستعمل من أجل توليد الاستطاعة الردية بهدف تحسين مواصفات الطاقة الكهربائية في مراكز الاستهلاك و التوليد، كما تُستخدم في المنشآت الكهربائية المختلفة.

٦- المضخّمات الكهربائية: تُستخدم المضخمات الكهربائية الدوّارة من أجل التحكم بالبنى الكهربائية ذات الاستطاعة العالية بواسطة إشارات كهربائية صغيرة الاستطاعة تُرسل إلى ملفات التحكم (التهييج) التي تدخل في تكوين هذه المضخمات.

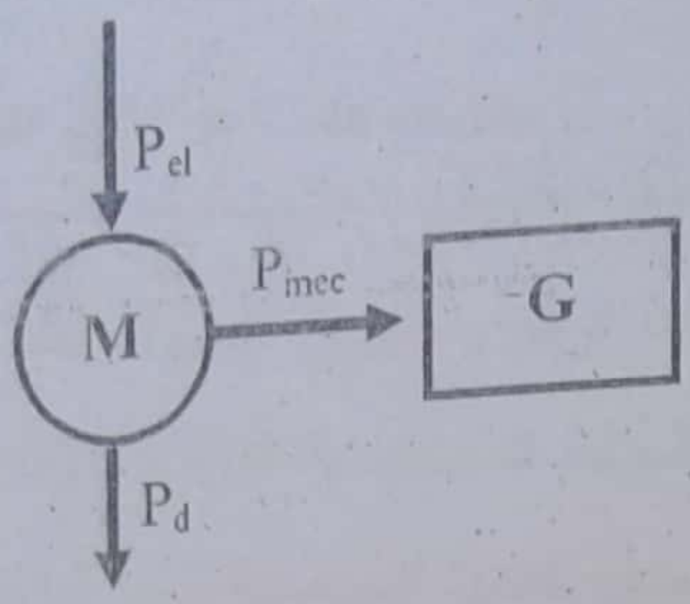
٧- مبدلات الإشارة الكهرميكانيكية: تولّد و تحوّل و تقوّي مختلف الإشارات. تُنفذ هذه المبدلات على شكل آلات كهربائية ميكروية تُستعمل بشكل واسع في جُمل التحكم الآلي و في القياسات و العدادات و في مختلف المجسات و في العناصر التفاضلية و التكاملية و في الأجهزة التحكمية.

Scanned by CamScanner



الشكل (١-٤): طـرق تصنيف الآلات الكهربائيـة

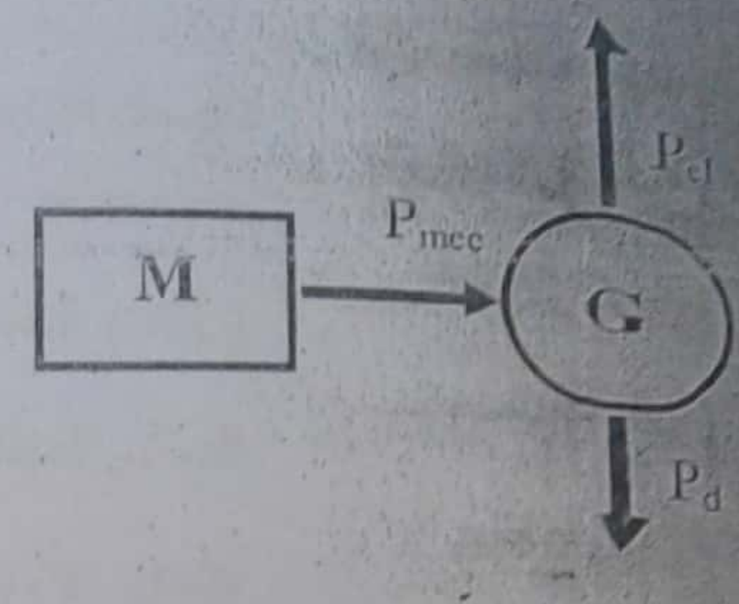
Scanned by CamScanner



الشكل (١-٦): المحركات الكهربائيـــة

M: محرك كهربائي

E: تجهيزة مُقـــادة



الشكل (١-٥): المولّدات الكهربائيـــة

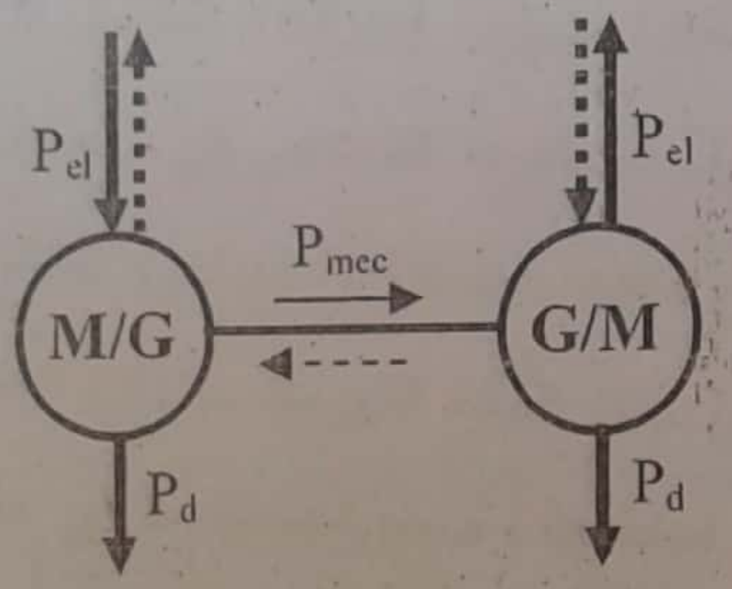
M: آلـــة قائـــدة

G: مولـــدة كهربائية

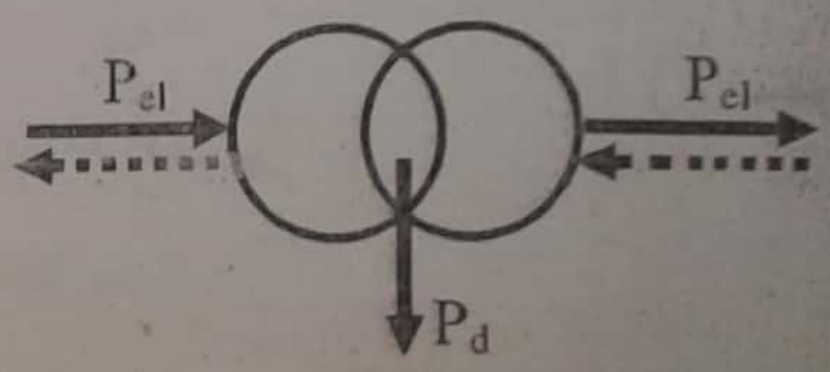
P_{el}: استطاعـــة كهربائيـــة

P_{mec}: استطاعـــة ميكانيكيـــة

P_d: الضياعـــات



الشكل (١-٨): المبدلات الكهربائيـــة



الشكل (١-٧): المحولات الكهربائيـــة

١-٣-٢- تصنيف الآلات الكهربائيـــة حسب التيـــار:

تُقســـم الآلات كهربائيـــة حسب نوع التيـــار إلى:

١- **آلات التيـــار المتناوب:** تُقســـم هـــذه الآلات بدورها، حسب مبـــدأ عملها و خصائصها الكهرومغناطيسية، إلى:

آلات تحريضية (آلات غير متواقتـــة)، آلات متواقتـــة، آلات ذات المجمّعات و المحولات.

- **الآلات التحريضية (الآلات غير المتواقتـــة):** تُستخدم هـــذه الآلات بشكل رئيس كمحركات أحاديـــة و ثلاثيـــة الطـــور،حيث تُستعل استعمالاً واسعـــاً في قيـــادة التجهيزات الصناعيـــة

Scanned by CamScanner

(آلات التشغيل المختلفة، آلات الرفع و الجر، الضواغط، المراوح،...). تكون سرعة الدوّار الميكانيكية و سرعة الساحة المغناطيسية الدوّارة للثابت غير متساوية (غير متوافقة) تُشكل الآلات التحريضية، بفضل تكلفتها المنخفضة نسبياً الناتجة عن بساطة تركيبها وصناعتها بالإضافة الى موثوقيتها، أكثر من ٨٠ ٪ من الآلات الكهربائية المستخدمة في القطاع الصناعي. ساعد التقدم الحاصل في مجال الالكترونيات الصناعية وتجهيزات التحكم العاملة بالزمن الحقيقي هذه الآلة لتحل مكان محرك التيار المستمر في معظم التطبيقات ذات السرعة المتغيرة.

- **الآلات المتوافقة:** في هذه الآلات تكون سرعة الدوّار الميكانيكية و سرعة المساحة المغناطيسية الدوّارة للثابت متساوية (متوافقة). تُستعمل الآلات المتوافقة في الحياة العملية غالباً كمولدات للتيار المتناوب ذو التردد الصناعي في محطات الطاقة الكهربائية، و كمولدات عالية التردد في منابع التغذية المستقلة (البواخر، الطائرات،...). كما تُستعمل، بشكل أقل، كمحركات متوافقة في جُمل القيادة الكهربائية ذات الاستطاعات الكبيرة. يوجد أنواع مختلفة من هذه الآلات ذات استطاعات صغيرة مُستخدمة في جمل التحكم مثل: الآلات الخطوية- الآلات ذات المغانط الدائمة- الآلات الردية- الآلات التباطؤية.

- **الآلات ذات المجمّعات:** يحتوي هذا النوع من الآلات على مبدلة تردد ميكانيكية (المجمّع). تستعمل بشكل رئيس كمحركات كهربائية لها تصميم معقّد نسبياً يحد من استعمالها. تُستخدم في جُمل الأتمتة و في مختلف الأجهزة المنزلية كمحركات عامة ذات مجمّع تعمل على التيار المتناوب و على التيار المستمر.

- **المحولات:** تشبه عملية تحويل الطاقة فيها عملية تحويل الطاقة في الآلات الكهربائية الدوّارة ذات التيار المتناوب.

٢- **آلات التيار المستمر:** و هي تُستخدم في الحياة العملية كمحركات و كمولدات. تُستعمل كمحركات في جمل القيادة التي تتطلب تنظيم السرعة ضمن مجال كبير (وسائط النقل البحرية، القطارات، وحدات دلفنة المعادن، آلات الرفع و الجر، آلات معالجة المعادن،...) كما تُستعمل هذه المحركات عندما تكون منابع التغذية المتاحة هي المدخرات الكهربائية (محركات بدء التشغيل و الاقلاع، محركات الغواصات و المركبات الفضائية،...). تُستعمل

Scanned by CamScanner

عالياً الآلات التيار المستمر كمولدات لتغذية تجهيزات الاتصالات و من أجل شحن المدخرات، كما تُستعمل كمنابع تغذية أساسية في وسائط النقل (السيارات، الطائرات، الفن، القدارات،...).

بيد أن استخدام مولدات التيار المستمر أخذ يتراجع في الآونة الأخيرة لصالح مولدات التيار المتناوب المزودة بوحدات تقويم التيار. تُستخدم آلات التيار المستمر على نطاق واسع في جُمل التنظيم الآلية بوصفها مضخّمات دوّارة و محركات مُنفذة و مولدات تاكو.

١-٣-٣- تصنيف الآلات الكهربائية حسب الاستطاعة:

تُقسم الآلات كهربائية حسب الاستطاعة إلى آلات ميكروية (ذات استطاعة صغيرة جداً) و آلات صغيرة و آلات متوسطة و آلات عالية الاستطاعة.

تملك الآلات الميكروية استطاعات من عدة واطات حتى 0,5 Kw و تعمل على التيار المستمر و على التيار المتناوب بترددات نظامية أو ترددات عالية (200 ÷ 400) Hz. تعمل الآلات ذات الاستطاعة الصغيرة (0,5 ÷ 10) Kw على التيار المستمر و على التيار المتناوب عند ترددات نظامية أو عالية. تتفاوت استطاعة الآلات ذات الاستطاعة المتوسطة من 10 Kw حتى عدة مئات من الكيلو واط و تعمل هذه الآلات على التيار المستمر أو على التيار المتناوب عند التردد النظامي. بينما تكون استطاعة الآلات ذات الاستطاعة الكبيرة أكبر من عدة مئات من الكيلو واط و هي تعمل على التيار المستمر أو على التيار المتناوب عند التردد النظامي.

١-٣-٤- تصنيف الآلات الكهربائية حسب سرعة الدوران:

تُقسم الآلات كهربائية حسب سرعة الدوران إلى آلات:

١- بطيئة السرعة: تصل سرعتها حتى 300 r.p.m،
٢- متوسطة السرعة: تكون سرعتها بين [300÷1500] r.p.m ،

Scanned by CamScanner

٣- آلات سريعة: تكون سرعتها بين r.p.m [1500÷6000] ،
٤- عالية السرعة: تكون سرعتها أعلى من r.p.m 6000.

تُصمم الآلات الميكروية لتعمل بسرعة دوران تتراوح من عدة دورات في الدقيقة حتى r.p.m 60000 و الآلات العالية و المتوسطة الاستطاعة عادة حتى r.p.m 3000.

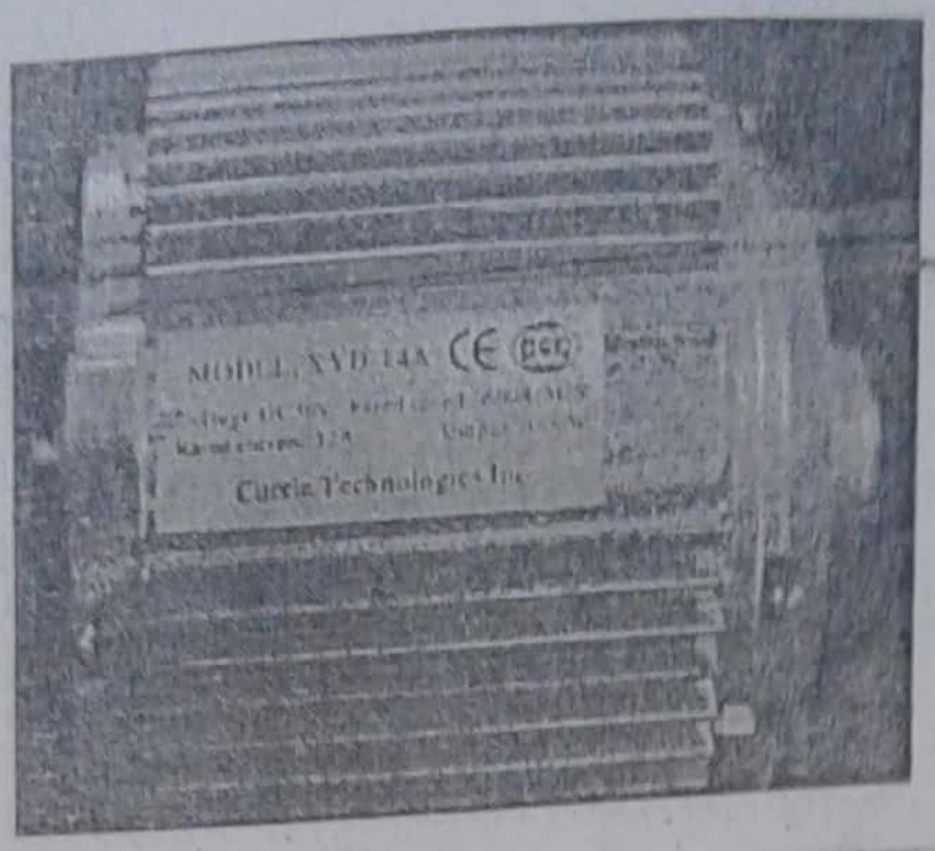
١-٤- اللوحة الاسمية للآلات الكهربائية:

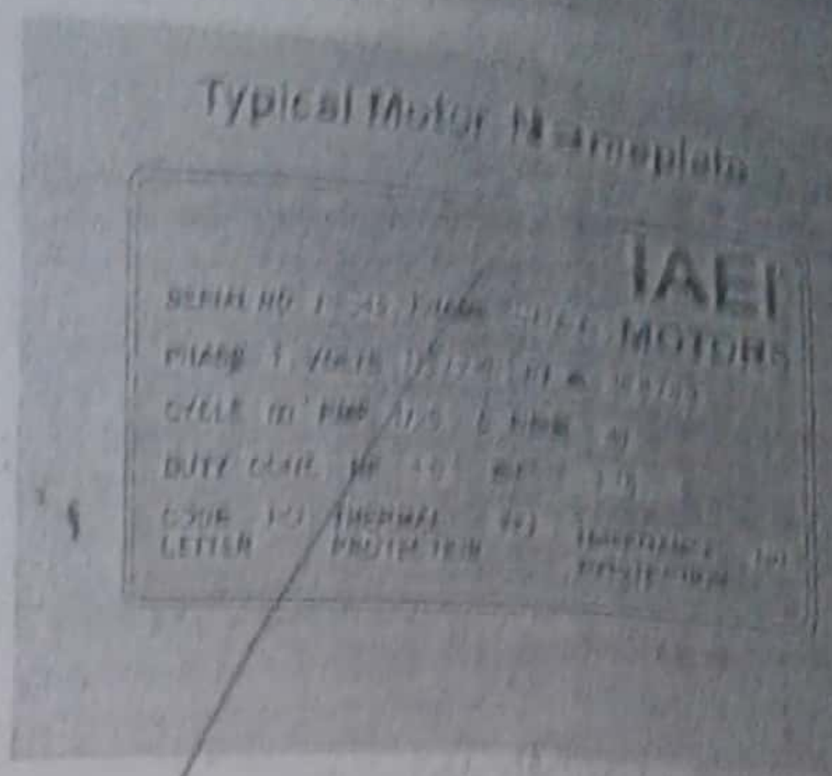
Namèplate of Electrical Machines

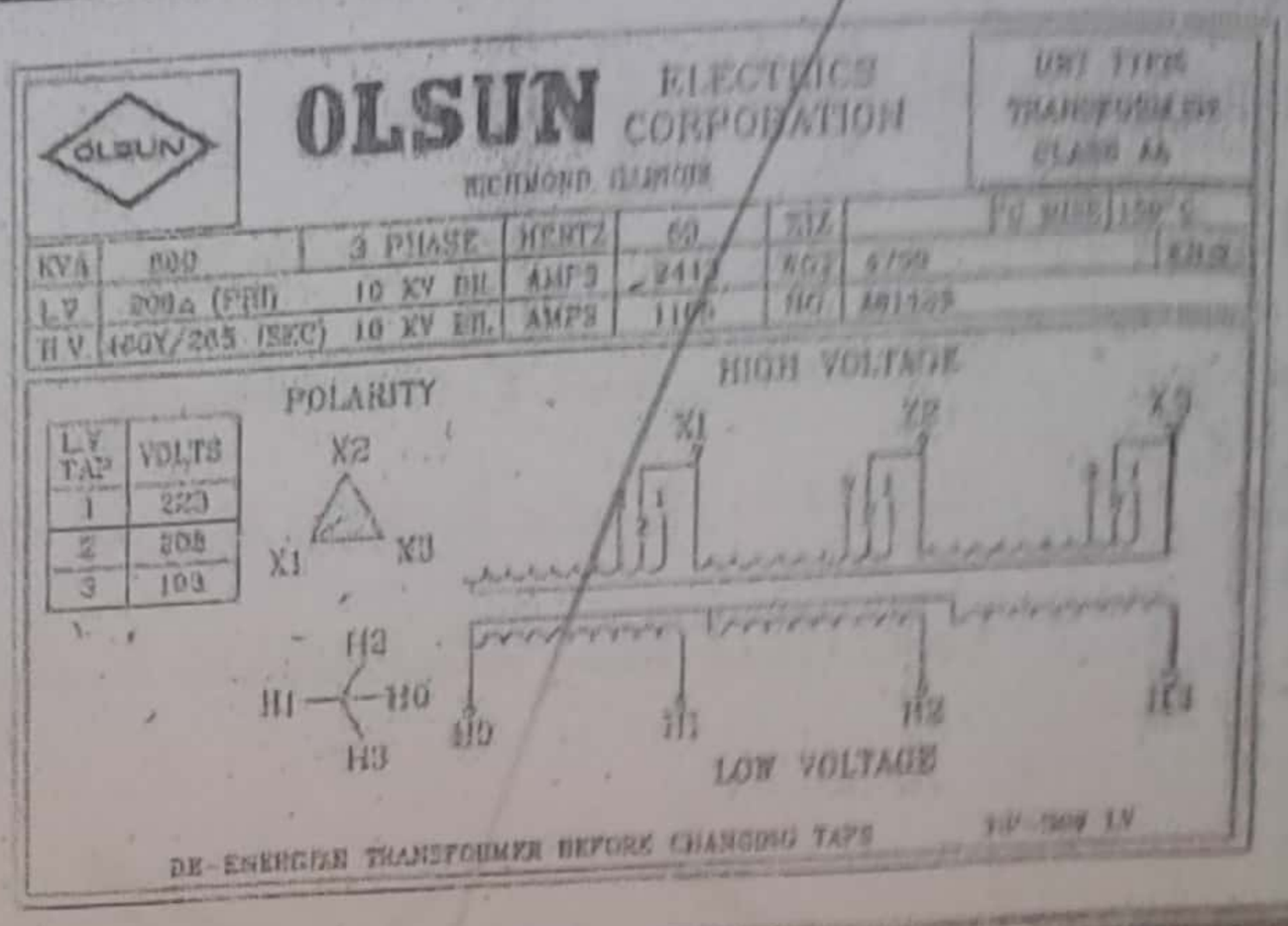
اللوحة الاسمية لآلة كهربائية هي عبارة عن لوحة معدنية مثبتة على جسم الآلة، يُشار فيها إلى طراز الآلة و معطياتها الاسمية التي تميز مؤشرات الطاقة الأساسية و شروط العمل المصممة عليها الآلة المعنية، الشكل (١-٩).

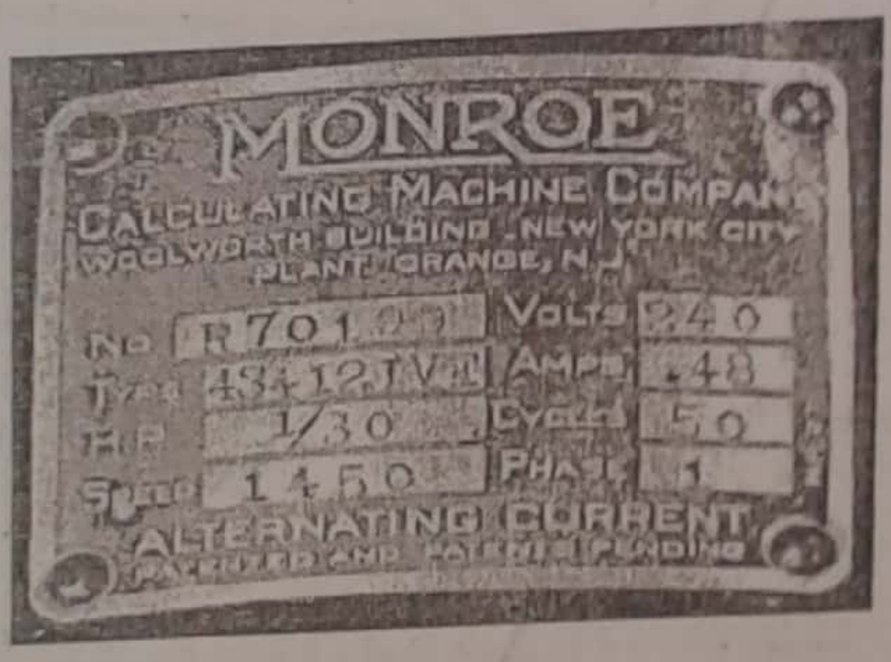
تنتمي إلى هذه القيم الاسمية: الاستطاعة، التوتر، التيار، سرعة الدوران، تردد التيار المتناوب، المردود، عدد الأطوار، عامل الاستطاعة، نظام العمل (مستمر، قصير الزمن، متكرر، ...). كما تعطي اللوحة الاسمية المعطيات التالية: الجهة الصانعة، تاريخ الصنع، نوع العازلة، و أيضاً قيم إضافية ضرورية لاستثمار و صيانة الآلة مثل الوزن و طريقة توصيل الملفات و ....الخ. يُمكن استعمال مصطلح القيم الاسمية إلى مقادير غير موجودة في اللوحة لكنها تميّز حالة العمل الاسمي مثل: عزم الدوران الاسمي، تيار التهييج الاسمي، الانزلاق الاسمي.

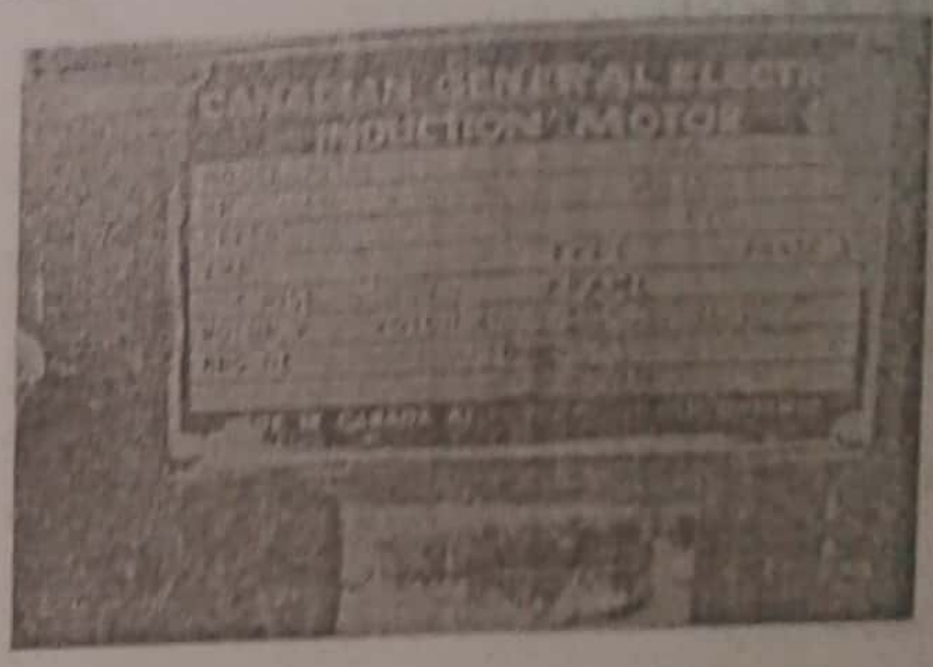
Scanned by CamScanner











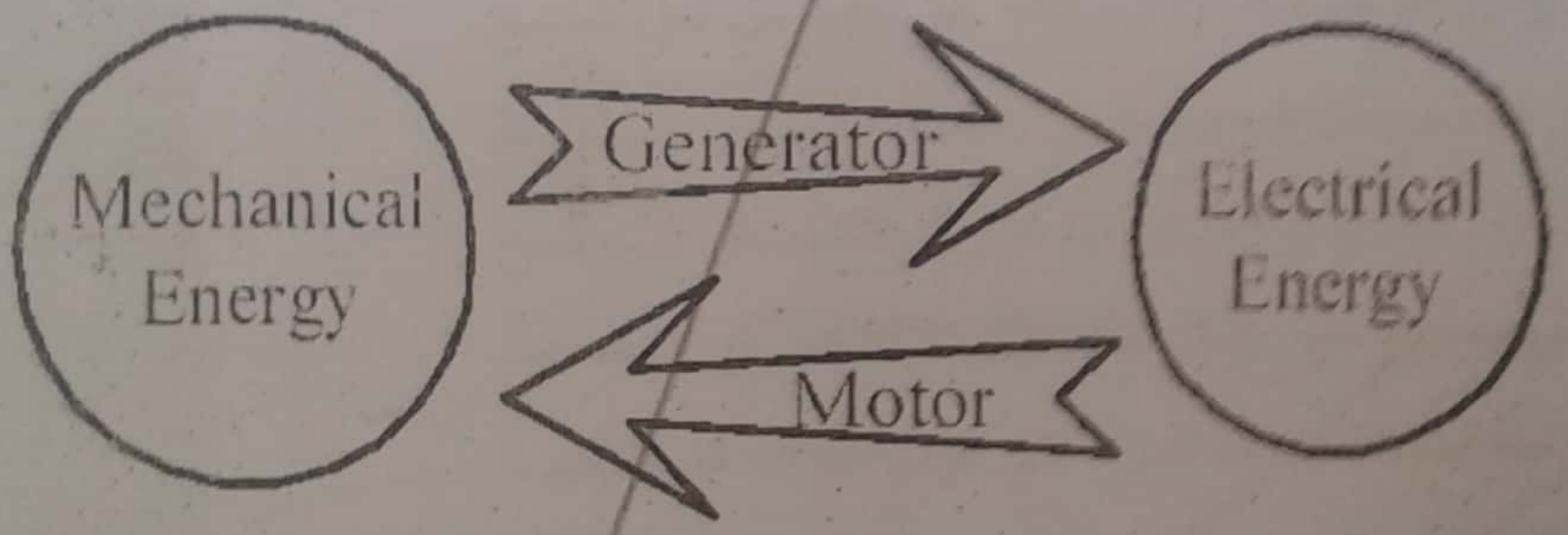
الشكل (١-٩): لوحات اسمية لبعض الآلات الكهربائية

القيم الاسمية للآلة الكهربائية هي القيم التي تصمم عليها هذه الآلة لكي تعمل بشكل سليم، دون تجاوز الحدود الحرارية، و من دون تعطل خلال فترة التشغيل المحددة لهذه الآلة.

تستطيع الآلات الكهربائية أن تعمل عند ظروف عمل غير اسمية مثل ارتفاع أو انخفاض الاستطاعة، أو التوتر، أو التيار، أو ...الخ، لكن عند العمل في مثل هذه الظروف تختلف مؤشرات الطاقة للآلة عن المؤشرات المدونة في لوحتها الاسمية. عادة يكون المردود

Scanned by CamScanner

و عامل استطاعة الآلة أقل من القيم الاسمية لها عند حمولات تقل عن الحمولات الاسمية. يظهر خطر الارتفاع الكبير في درجة حرارة أجزاء الآلة، عند تحميلها بحمولات أكبر من الحمولة الاسمية، بشكل أساسي على ملفاتها مما قد يؤدي إلى تلف عازلية هذه الملفات و بالتالي توقف الآلة. تتعلق درجة الحرارة العظمى المسموحة للملفات بنوع العازلية المستعملة و مدة تشغيل الآلة و هي تتراوح ما بين C° (105÷180). تُحدد درجات الحرارة القصوى لأجزاء الملفات المختلفة وفق معايير دولية خاصة متعارف عليها. تعد الآلات الكهربائية آلات عكوسة تستطيع أن تعمل في نظام المولد و المحرك، أي أن اتجاه تحول الطاقة يمكن أن يتغير بشكل معاكس كما أن هذه الخاصية تنطبق على المبدلات الدوّارة و المحولات، الشكل(١-١٠)، بيد أن الآلات الكهربائية تخصص للعمل في نظام واحد عند انتاجها مما يجعل الآلة أكثر ملائمة لمتطلبات الاستثمار و أن تكون أقل حجماً و أخفض كلفة.



الشكل (١-١٠): اتجاه تحول الطاقة في الآلات الكهربائية (العكوسة)

يتم تصميم الآلات الكهربائية لتعمل بتوترات معيارية متوافقة مع التوترات المعيارية للشبكات الكهربائية. يكون التوتر المعياري للمولدات أكبر من التوتر المعياري للمحركات بمقدار %(5÷10)، مثلاً: اذا كان التوتر المعياري للمحرك 220V فإن التوتر المعياري للمولد هو 230V. إن الاختلاف في التوترات المعيارية للمولدات و المحركات مشروط بهبوط التوتر في الشبكات الكهربائية التي تربط ما بين هذه المولدات و المحركات. أما في المحولات فتأخذ التوترات المعيارية من جهة الملفات الأولية مساوية لتوترات المحركات وفي جهة الملفات الثانوية تكون مساوية لتوترات المولدات.

Scanned by CamScanner

تُصمم آلات التيار المتناوب في الغالب للعمل على توترات جيبية متناظرة بالنسبة لجميع الأطوار، و تحدد درجة اختلال هذه الشروط في جداول المعايير و المواصفات فمثلاً: يجب أن لا يزيد مقدار انحراف التوتر في تجهيزات الطاقة الكهربائية عن %(10÷5)، كما أن معامل تشوه المنحني الجيبي يجب أن لا يتجاوز 5%.

تتعرض عادة الآلات المخصصة للعمل مع مبدلات التيار لتأثير توترات و تيارات غير جيبية تسبب حدوث ضياعات اضافية للاستطاعة داخل هذه الآلات و ارتفاعاً في درجة حرارة الملفات و النوى المغناطيسية، و تُحدد قواعد تشغيل مثل هذه الآلات وفق شروط فنية خاصة.

١-٥- المواد المستخدمة في تصنيع الآلات الكهربائية:

Materials Used in the Manufacture of Electrical Machines

إن النجاح في اختيار الأبعاد الرئيسية و التصميمية، و في اجراء الحسابات الكهروكغناطيسية الدقيقة لآلة كهربائية هو شرط لازم و لكنه غير كاف من أجل تصنيع آلة كهربائية ذات جودة و اقتصادية جيدة و ذات قدرة على العمل، ضمن الشروط التصميمية، دون تعطل، و من أجل تحقيق ذلك يجب اقتران هذا الشرط بالاختيار الصحيح لخواص و نوعية المواد المستخدمة في تصنيع هذه الآلة. تملك عملية الاختيار الصحيح للمواد، في النظام المغناطيسي و عازلية الملفات اضافة للمواد التي تؤمن المتانة الميكانيكية المناسبة لجميع أجزاء الآلة، أهمية خاصة حيث يتم التميز بين الآلات الكهربائية، المتماثلة من حيث المواصفات الفنية و الحسابات التصميمية، و تحديد جودتها و بالتالي سعرها من خلال نوعية و خواص المواد المستخدمة في تصنيعها.

تقسم المواد المستخدمة في تصنيع الآلات الكهربائية إلى:

- مواد فعالة
- مواد عازلة
- مواد تصميمية

Scanned by CamScanner

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 يمكن 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 تقســـم 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 $1(\mu_r$ 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 أســـعار الأخيرة يجعلها في المرتبة الثانية.

إن المواد المغناطيسية المستعملة في الآلات الكهربائية تختلف حسب طبيعـــة المـــواد 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

Scanned by CamScanner

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، ممسحوبة 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 Silicium إلى 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

Scanned by CamScanner

بين (250÷1000000) مرة.

٢ – تحريضها المغناطيسي الأعظمي عالٍ ويتراوح بين (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- المواد الناقلة:

آ- النحاس:

يُعد النحاس من أكثر المعادن الناقلة استعمالاً في الآلات الكهربائية لحسن صفاته الكهربائية والحرارية، إذ يدخل في صنع ملفاتها الرئيسية والمساعدة ومرابطها ووصلاتها. يستعمل النحاس وهو نقي جداً ويستحصل بالتحليل الكهربائي، يتصف النحاس بقابليته الجيدة للكهرباء إذ تبلغ مقاومته الكهربائية النوعية عند درجة الحرارة (20 درجة مئوية) قيمة: ($17,24 .10^{-9} \Omega . mm^2 / m$) وهي تتغلق تعلقا ملحوظا بتلوثه بالشوائب الغريبة. الوزن النوعي للنحاس ($8,9 g/cm^3$) ودرجة انصهاره ($1083 C^o$).

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

تصنع من النحاس المصفى أسلاك رفيعة، بالسحب الساخن في آليات خاصة حتى 0,1mm يصبح النحاس بعد السحب قاسياً نسبياً ويكتسب سقاية لذا تُعاد إليه خواصه بالتخمير في جو خالٍ من الهواء منعاً لتأكسده. يستعمل النحاس القاسي في الأماكن التي تتطلب صلابة ميكانيكية عالية كصفائح مبدلات آلات التيار المستمر (كما سنرى)، كما يستعمل النحاس اللين في نواقل وملفات الآلات الكهربائية.

Scanned by CamScanner

ب – الألمنيوم:

وهو من أكثر المواد الناقلة استعمالاً بعد النحاس. يُستخرج الألمليوم من فلزات البوكسيت ($Al_2O_3 + 2H_2O$) Bauxit، بعد تنقيتها بطريقة كيميائية، وتحصل عليه نقياً منصهراً بطريقة التحليل الكهربائي بعد إضافة مادة الكريوليت Gryolitلتخفيض درجة انصهار. وزن الألمنيوم النوعي ($2,7\ g/cm^3$)، ودرجة انصهاره (650°)، وأكبر مقاومة نوعية مسموح له بها ($0,0295.10^{-6}\ \Omega.mm^2/m$) وهي أكبر من النحاس بـــ (1,7) مرة.

يمتاز الألمنيوم بخفة وزنه ورداءة صفاته الميكانيكية، لذا يستعمل فقط في صنع 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- الفحم:

تتغذى ملفات الدائر في الآلات الكهربائية، أو يؤخذ منها التيار عبر مسفرات مصنوعة من الفحم. يستعمل الفحم لصنع مسفرات الآلات الكهربائية لحسن صفاته الكهربائية و الميكانيكية الملائمة لهذا الغرض. إذ أن الفحم يمتاز بارتفاع درجة انصهاره، و مرونته الجيدة، وثباته الكيميائي و حسن ناقليته للكهرباء و الحرارة و بصلابته الميكانيكية.

يحضر الفحم من فلزاته الطبيعية أو الصنعية بشكل بودرة و يمزج مع الصمغ العضوي ثم تكبس الخليطة تحت ضغوط عالية ($500 \div 3000\ kg/cm^2$) و يشوى الناتج تحت حرارة عالية ($1400 \div 2500\ C^\circ$) نميز عدة أنواع للفحم المستعمل في الآلات الكهربائية و ذلك حسب نوعية فلزات الفحم الممزوجة و حسب ارتفاع ضغط المكابس و طريقة الشوي فهنالك:

١- **الفحم القاسي:** يصنع من بودرة الكوكس النفطي أو من الغبار الفحمي، ويمزج مع الصموغ ويجفف ثم يُطحن ثانية ويكبس في مكابس خاصة وبأشكال متنوعة. تشوى

Scanned by CamScanner

المادة الناتجة في أفران تحت حرارة (1400 C°) 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°) حتى يصبح لينا، 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):

Scanned by CamScanner

الجدول (١-١): تصنيف المواد العازلة

صنف العازليه	Y	A	E	B	F	H	C
الدرجة المئوية القصوى، [C°]	90	105	120	130	155	180	أعلى من 180

١- عازل الصنف Y: يتركب من خيوط قطنية وأقمشة وورق ومواد سيليلوزية ليفية (عضوية) أو حرير غير مشربة وغير مغموسة في سائل عازل.

- أقصى درجة حرارة لمواد هذا النوع هي C° 90.

٢- عازل الصنف A: نفس مواد صنف العازل Y ولكنها مشربة أو مغموسة في سائل عازل.

- أقصى درجة حرارة لهذا النوع C° 105.

٣- عازل صنفE: رقائق عضوية تركيبية ومواد أخرى لها نفس الاستقرار الحراري.

- أقصى درجة حرارة C° 120.

٤ - عازل صنفB: مواد ذات أساس من الميكاMica والأمينط أو ذات أساس من الزجاج أو النسيج الليفي وذات عنصر تماسك عضوي.

- أقصى درجة حرارة C° 130.

٥ - عازل صنف F: مواد ذات أساس من الميكا والأمينط، أو ذات أساس من الزجاج أو النسيج الليفي متماسكة مع مواد صناعية ومشربة بمواد عضوية.

- أقصى درجة حرارة C° 155.

٦ - عازل صنف H: مواد ذات أساس من الميكا والأمينط أو ذات أساس من الزجاج أو النسيج الليفي مع مواد تماسك سيلكونية ومشربة بمواد عضوية.

- أقصى درجة حرارة C° 180.

٧ - عازل صنف C: مواد ذات أساس ميكا أو مواد السيراميك أو زجاج أو كوارتز تستعمل من دون أو مع قوة تماسك غير عضوية.

Scanned by CamScanner

- أقصى درجة حرارة تتجاوز $180\ C^{0}$ والتحدد فقط بالخواص الفيزيائية أو الكيميائية أو الكهربائية للمادة.

يجب عدم تجاوز درجات الحرارة العدية أبداً لأن ذلك سيؤدي الى تقصير عمر العازل وانهياره وسيقصر بالتالي عمر الآلات.

١-٥-٣- المواد التصميمية المستعملة في الآلات الكهربائية:

تستخدم المواد التصميمية في تحضير أجزاء و أقسام الآلة المخصصة بشكل رئيس لنقل الحمولة الميكانيكية، من بين هذه المواد: الحديد، حديد الزهر (الفونط)، المواد اللاحديدية و خلائطهم و أيضاً المواد البلاستيكية التي تدخل في بناء الهيكل الخارجي و الأغطية الواقية لكراسي التحميل و في صناعة عمود الدوران و بناء أجزاء المراوح و غيرها من المتطلبات العامة الضرورية في بناء الآلات الكهربائية.

١-٦- رموز العناصر الكهرومغناطيسية ووحداتها القياسية :

يبين كلٌ من الجدولين (١-٢) و (١-٣) معظم الرموز والوحدات القياسية للعناصر الأكثر استعمالاً في بحثنا للآلات الكهربائية.

يضم الجدول (١-٢) الوحدات القياسية في الجملة الدولية (الجيورجية) MKSA، من المعلوم في هذه الجملة أن واحدة الطول هي المتر m والكيلو غرام kg واحدة الكتلة وواحدة الزمن الثانية sec والأمبير A الواحدة الكهربائية في هذه الجملة.

وأما الجدول(١-٣) فيضم بعض الواحدات العملية في الجمل الأخرى.

الجدول (١-٢): الوحدات القياسية في الجملة الدولية (الجيورجية) MKSA

اسم القيمة	الرمز	الوحدة القياسية	
الكتلة	M	Kg	كيلو غرام
الطول	L	m	متر

Scanned by CamScanner

تتمـــة الجدول (١-٢):

الزمن	t	sec	ثانية
السرعة	V	m/sec	متر / ثانية
التسارع	A	m/sec^2	متر / ثانية مربع
القوة	F	N	نيوتن
العزم	T	Nm	نيوتن متر
العمل و القدرة	W	J	جـــول
الاستطاعة	P	W	واط
الشحنة الكهربائية	Q	C	كولون
شدة الساحة الكهربائية	E	V/m	فولت /متر
التحريض الكهربائي	D	C/m^2	كولون / مترمربع
التوتر	V	V	فولت
القوة المحركة الكهربائية	E	V	فولت
التيار	I	A	أمبير
كثافة التيار	J	A/mm^2	أمبير/ ميلي متر مربع
المقاومـة	R	Ω	أوم
المقاومـة النوعية	ρ	$\Omega . mm^2 / m$	أوم متر
السعة	C	F	فاراد
شدة الساحة المغناطيسية	H	A/m	أمبير / متر
التحريض المغناطيسي	B	Wb/m^2	ويبر / متر مربع
الفيض المغناطيسي	Φ	Wb	ويبر
القوة المحركة المغناطيسية	F	AT	أمبير لفة
الفيض المغناطيسي المتشابك	ψ	Wb	ويبر
المقاومة المغناطيسية	R_m	AT/ Wb	أمبير لفة/ويبر
التحريض الذاتي	L	H	هنري

Scanned by CamScanner

نتمة الجدول (١-٢):

التحريض المتبادل	M	H	هنري
السماحية المغناطيسية	μ	H/m	هنري / متر

الجدول (١-٣): بعض الواحدات العملية في الجُمل الأخرى

اسم القيمة	الرمز	الوحدة القياسية		ما يعادلها من الجملة الجيورجية
القوة	F	kgf	كيلو غرام ثقلي	9,81N
العزم	T	Kgf.m	كيلو غرام ثقلي متر	9,81N.m
العمل	W	Kgf.m	كيلو غرام ثقلي متر	9,81j
القدرة	W	wh	واط ساعي	$3,6 . 10^{3}$ j
القدرة	W	kwh	كيلو واط ساعي	$3,6 . 10^{6}$ j
كمية الحرارة	Q	cal	حريرة	4,187.j
كمية الحرارة	Q	kcal	كيلو حريرة	$4,187 . 10^{3}$ j
الاستطاعة	P	Kgf.m / sec	كيلو غرام ثقلي متر / ثا	9,81W

١-٧- الواحدات المغناطيسية في الجملة السغثية:

في هذه الجملة وحدة الطول هي الـ cm (سنتيمتر) أما وحدة الكتلة فهي الغرام g والثانية هي وحدة الزمن أما μ_0 فهي تساوي 4π في هذه الوحدة، الجدول (١-٤).

الجدول (١-٤): الواحدات المغناطيسية في الجملة السغثية

السيالة المغناطيسية	ماكسويل (Mx) Maxwel	1Wb = 10^{8} (Mx)
التحريض المغناطيسي	غوص (Gs) Gauss	1 Wb / m^{2} = 10^{4} (Gs)
شدة المجال المغناطيسي	أورستد (Oe) Oersted	1 Oe = 10^{3} / 4π (A / m)
القوة المحركة المغناطيسية	جيلبيرت Gillbert (Gb)	1 Gb = 10 / 4π (A)

Scanned by CamScanner

الفصـــل الثاني

المبـــادىء الأساسية لعمـــل الآلات الكهـــربائية
Basic Principles of Electrical Machines

٢-١ - مقدمـــة: Introduction

يَعتَمد مبـــدأ عمل الآلات الكهربائية بشكل عـــام على قوانيـــن فيزيائيـــة أساسية فـــي التحريض الكهرومغناطيسي و القـــوى الكهرومغناطيسية هي قوانين فرداي فـــي التحـــريض الكهرومغناطيسي Faraday's Laws of Electromagnetic Induction و قـــانون أمبيـــر في القـــوى الكهرومغناطيسية Ampere's law of Electromagnetic Forces.

لكن قبـــل الخوض في دراسة هـــذه القوانين الفيزيائية و كيفية عمل الآلات الكهربائية بشكل عام، لا بد من التذكير ببعض المفـــاهيم و المـــصطلحات و المقـــادير المغناطيـــسية و الكهرومغناطيسية التي سيتم استخدامها أثناء تناولنا للمواضيع المختلفة في هذا الكتاب والتـــي تخـــص الآلات الكهربائيـــة بـــشكل عـــام و آلات التيـــار المـــستمر بـــشكل خـــاص.

٢-٢ - تذكيـــر ببعض المصطلحات الفيزيائية:

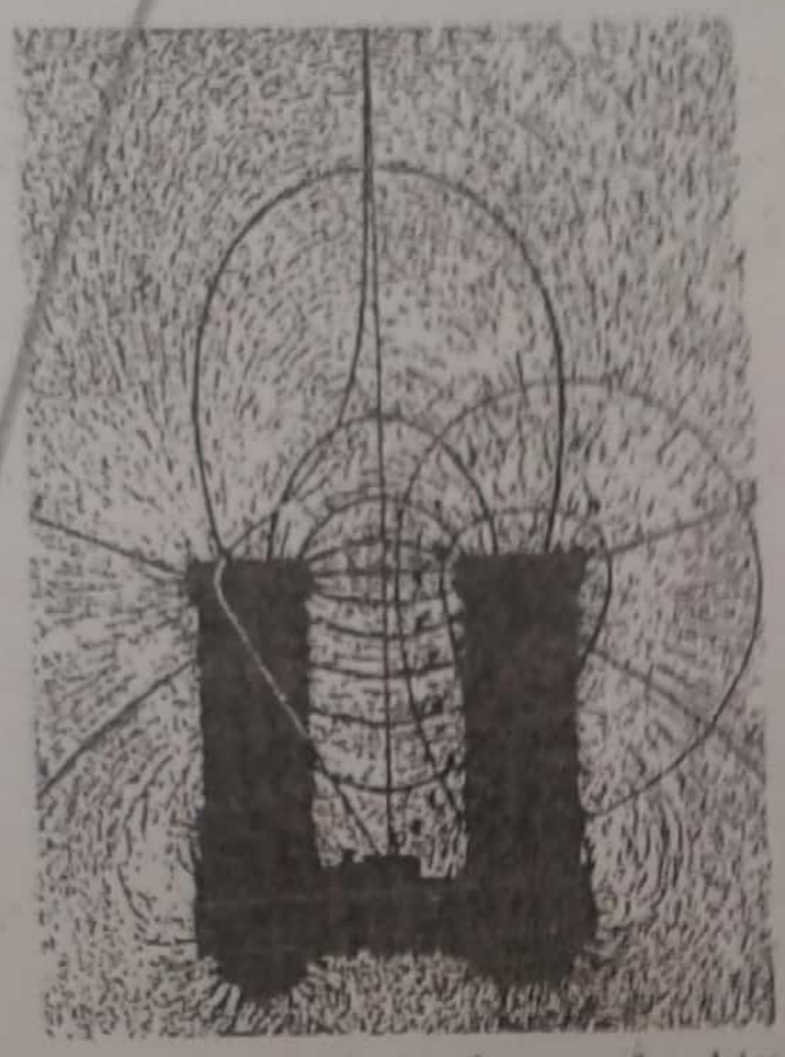
Recalls of Some Physical Conventions

٢-٢-١- تعـــاريف:

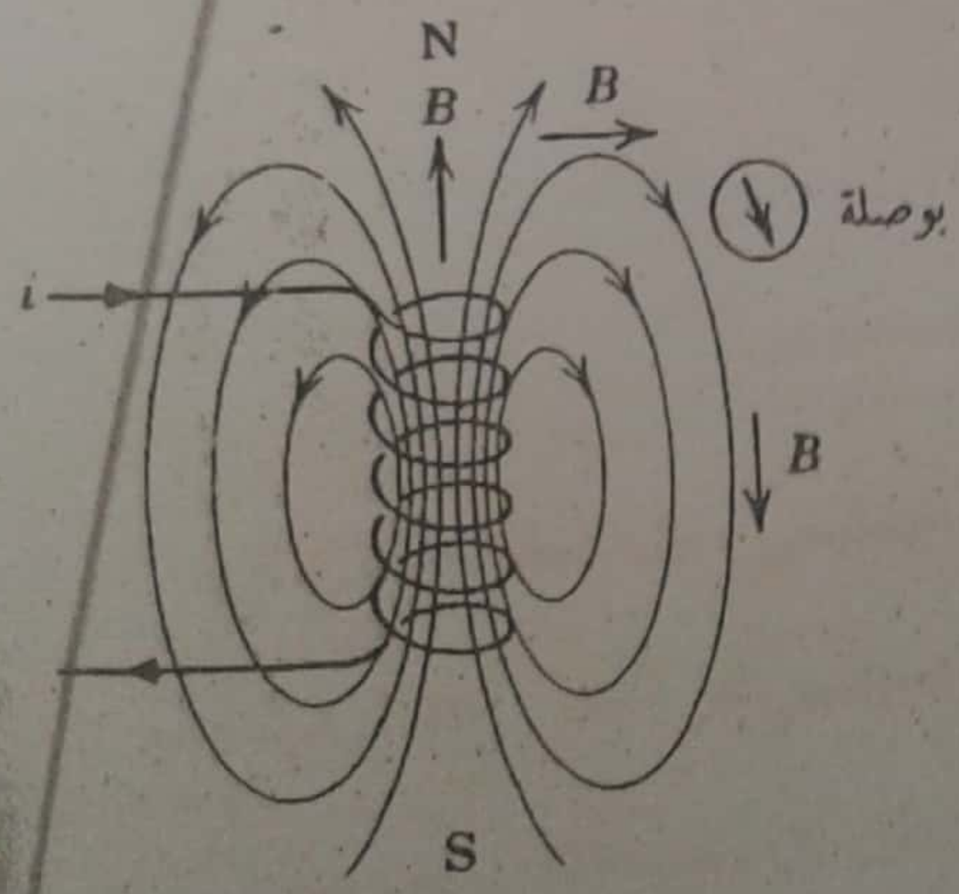
١- **الحقل المغاطيسي و السيالة المغناطيسية:** يُـــعرف الحقـــل المغناطيسي لمغناطيس (دائم أو كهربائي) بأنـــه المنطقة التي تحيط بالمغناطيس وتَظهر فيها تأثيراتـــه المختلفـــة كـــانحراف

Scanned by CamScanner

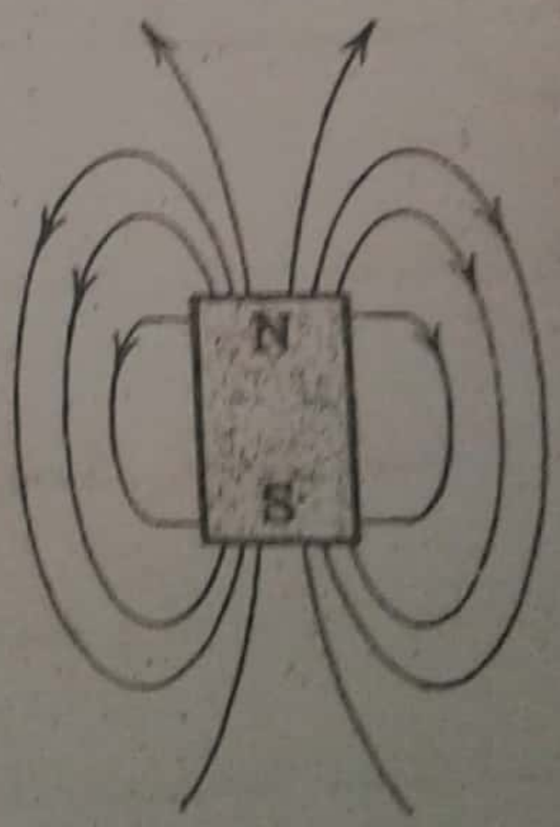
الأثرة المغناطيسية أو توليد قوة دافعة كهربائية عند تحريك ناقل في نفس الحقل، وقد تم تخيل خطوط قوى مغناطيسية اوصف الحقل المغناطيسي تخرج من القطب الشمالي وتدخل القطب الجنوبي يمكن تمثلها عملياً بذر برادة الحديد فوق صفيحة من الورق موضوعة فوق قضيب مغناطيسي حيث تشكل هذه الذرات خطوطاً منحنية مغلقة تسير من قطب لآخر، الشكل (٢-١). يُعبر عن عدد خطوط القوة المغناطيسية بالفيض المغناطيسي أو السيالة المغناطيسية و يرمز له بـ Φ.



خطوط القوى المغناطيسية مرسومة بواسطة برادة الحديد لمغناطيس شكل حرف U



المجال المغناطيسي لوشيعة كهربائية



المجال المغناطيسي لمغناطيس دائم

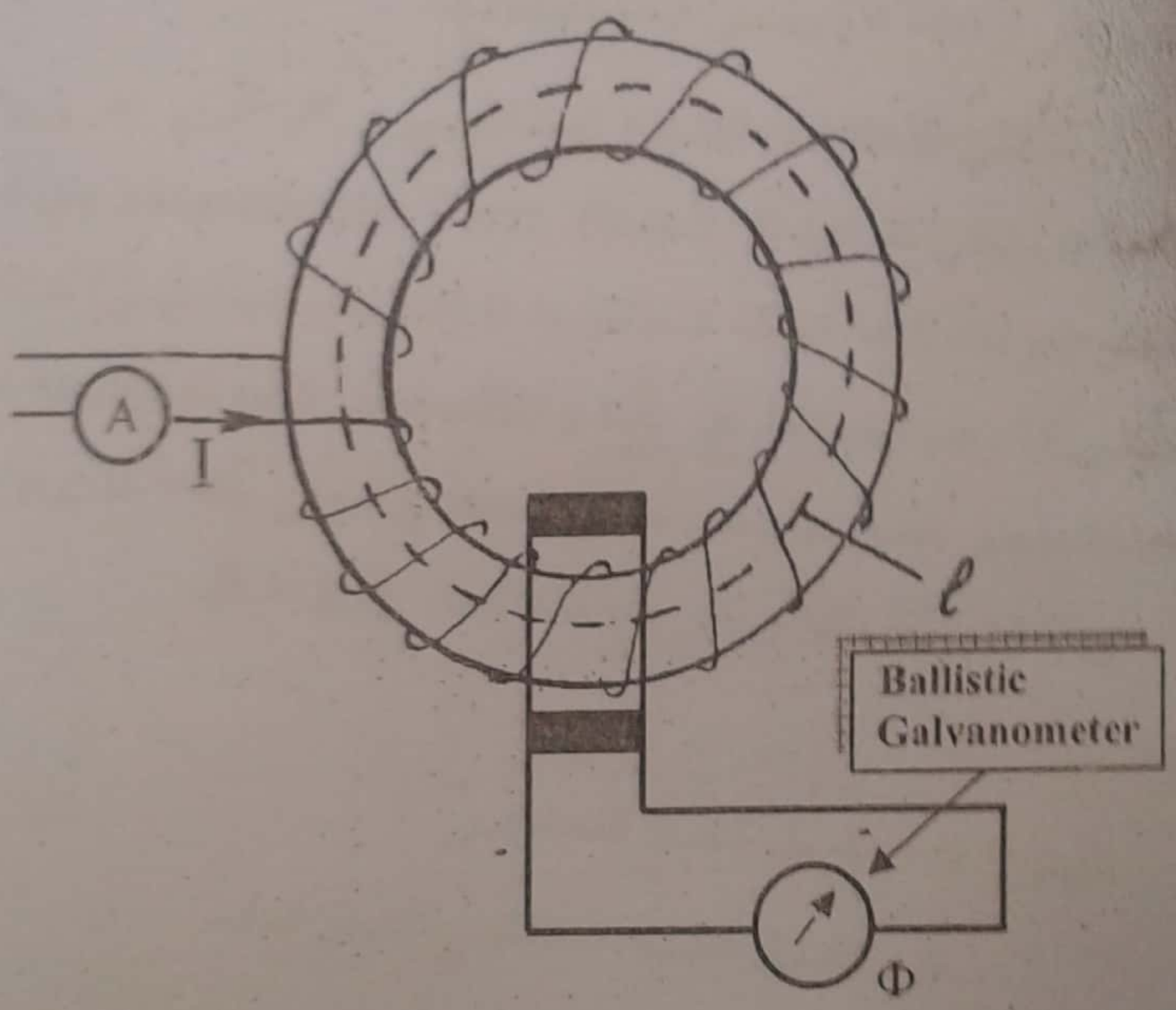
الشكل (٢-١): المجال المغناطيسي وخطوط القوى المغناطيسية

Scanned by CamScanner

٢ - تحديد المجال المغناطيسي H والتحريض المغناطيسي B:

يبين الشكل (٢-٢) حلقة مصنوعة من مادة غير مغناطيسية ملفوف عليها وشيعة عدد لفاتها N لفة، يمر فيها تيار شدته I . وحسب قوانين الدارات المغناطيسية يمكن كتابة ما يلي :

تمثل القيمة $F = NI$ القوة المحركة المغناطيسية (ق.م.م) Magneto Motive Force، وتختصر إلى (mmf) وهي عبارة عن الضغط المغناطيسي الذي يعمل على دفع خطوط السيالة (الفيض) المغناطيسية وتتوقف قيمة القوة المحركة المغناطيسية على قيمة التيار المار في الوشيعة وعلى مقدار عدد اللفات N وتُقدر F بـ أمبير لفة [AT].



الشكل (٢-٢):دارة لقياس كل من شدة المجال و التحريض المغناطيسيين

- بفرض أن ℓ طول المسار الوسطي للحقل المغناطيسي داخل الحلقة، فتكون قيمة شدة المجال المغناطيسي مساوية لـ $H = \frac{NI}{\ell}$ و تُقدر بـ امبير لفة / متر [A.T/m]، و يمكن تعريف H على أنه القوة الدافعة المغناطيسية التي تقابل كل وحدة طول من المسار المغناطيسي. وهكذا يمكن معرفة قيمة H بمعرفة كل من قيمة التيار، عدد اللفات و المحيط الوسطي للحلقة.

Scanned by CamScanner

– نتيجة مرور تيار كهربائي في الوشيعة سينشأ فيض مغناطيسي نرمز له Φ والواحدة المستعملة في قياس الفيض هي الويبر [Wb]. يتم قياس الفيض المغناطيسي من خلال مقياس التدفق الذي يدعى Ballistic Galvanometer الموصول إلى ملف آخر عدد لفاته 'n موضوع فوق الملف السابق كما في الشكل (٢-٢). من خلال معرفة قيمة Φ من قراءة المقياس و S مساحة مقطع الحلقة يمكننا حساب التحريض المغناطيسي أو كثافة الفيض المغناطيسي B من العلاقة $B = \frac{\Phi}{S}$. تُمثل هذه القيمة عدد خطوط الفيض المغناطيسي التي تمر في واحدة السطوح من مقطع الحلقة. إن الواحدة المستعملة في قياس كثافة الفيض المغناطيسي هي [Wb/m^2] وتسمى أيضاً [Tesla].

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:

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

μ_r : عامل النفاذ المغناطيسي النسبي للمادة.

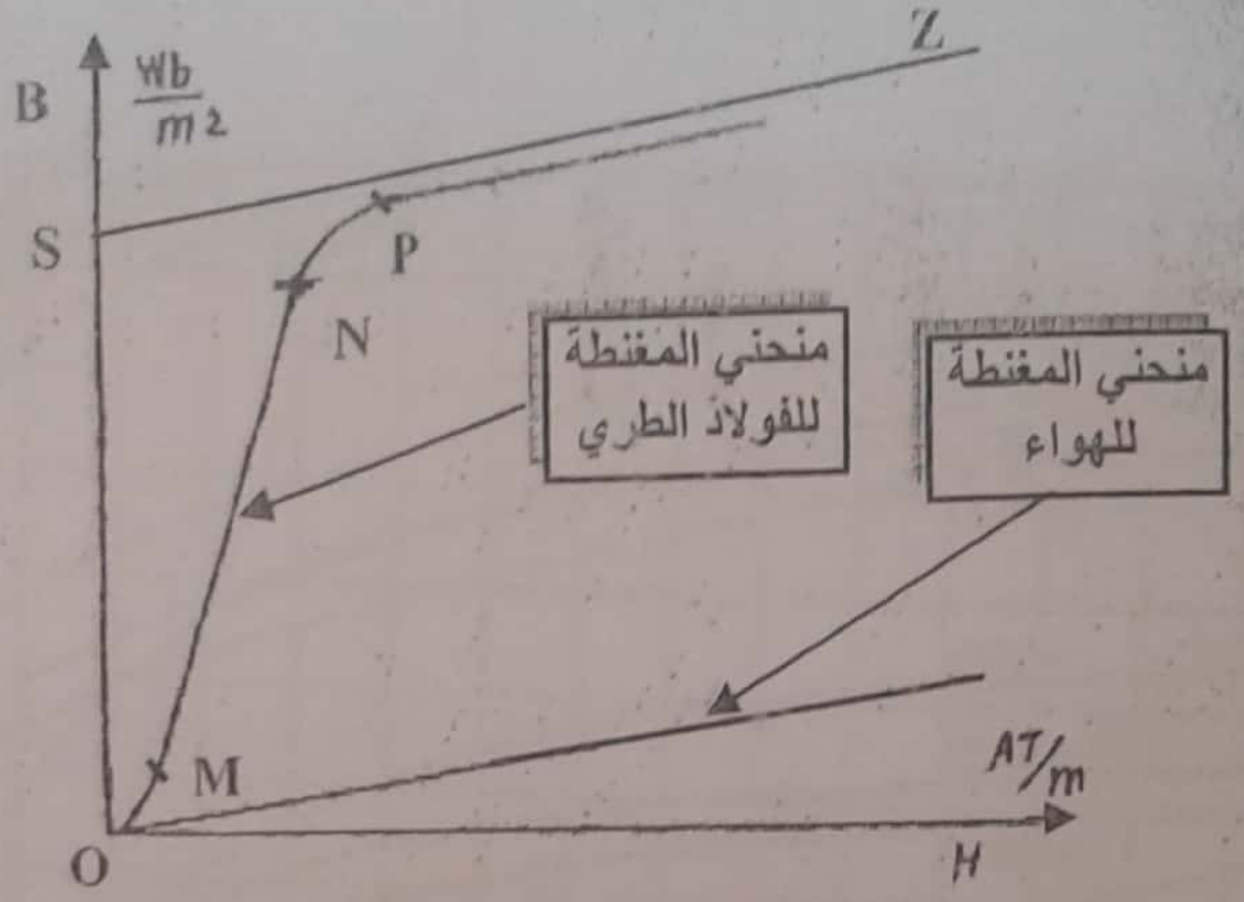
$\mu_o = 4\pi.10^{-7} \frac{H}{m}$: عامل النفاذ المغناطيسي في الفراغ.

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 المقياسين ثم نرفع شدة التيار إلى قيمة أعلى دون أن نجعلها تتناقص مطلقاً أثناء ذلك. و هكذا

Scanned by CamScanner

نحصل على عدة قيم متوافقة لكل من Φ و I و بالتالي لـ B و H، انطلاقاً من هذه النتائج نقوم برسم B كتابع لـ H فنحصل على المنحني المبين في الشكل (٢-٣) و ذلك في حالة كون النواة مصنوعة من الفولاذ الطري.



الشكل (٢-٣): منحني التمغنط للفولاذ الطري

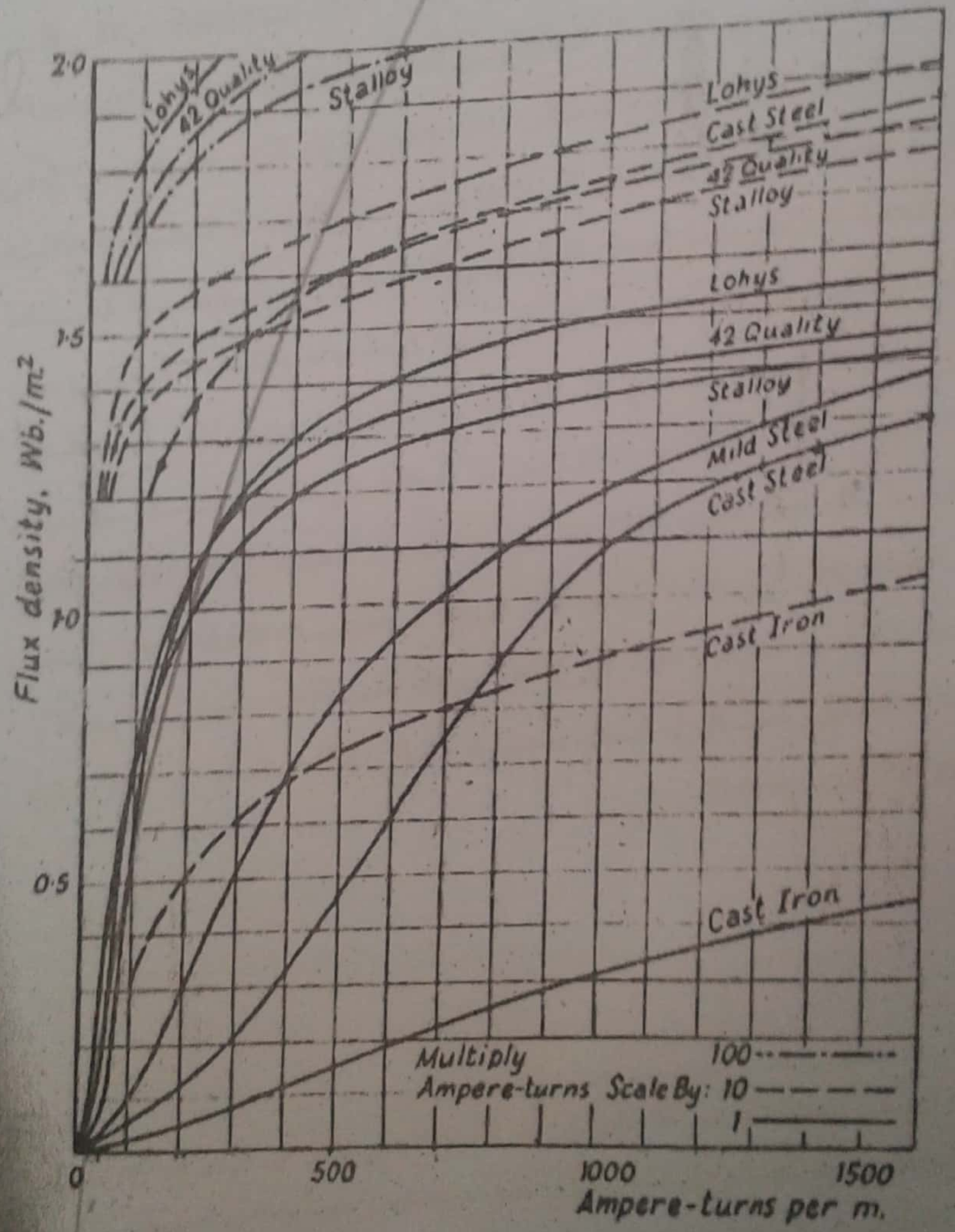
اذا تفحصنا هذا المنحي نلاحظ:

- 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 كبيرة لأنه ينتهي من أجل حقل مغناطيسي ضعيف جداً.
  - قسم ثاني يمكن اعتباره عملياً قسم خطي MN، في هذا القسم تكون B متناسبة تقريبا بشكل طردي مع H.
  - قسم ثالث و الذي يدعى بركبة المنحني NP.
  - قسم رابع يأخذ فيه المنحني شكلاً مقارباً مع المستقيم SZ، ويكون قانون تزايد B مطابقاً في هذه المرحلة لتزايده في الفراغ فيتصرف الفولاذ

Scanned by CamScanner

اذاً في هذه الحالة كالهواء ونقـول أن المعـدن قـد تـشبع مغناطيـسياً Magnetically Saturated.

يبيـن الشكل (٢-٤) منحنيات الخواص المغناطيسية لبعض المواد الحديدية المستخدمة بشكل واسع في الآلات الكهربائية والدارات المغناطيسية.



الشكل(٢-٤): منحنيات الخواص المغناطيسية لبعض المواد الحديدية

Scanned by CamScanner

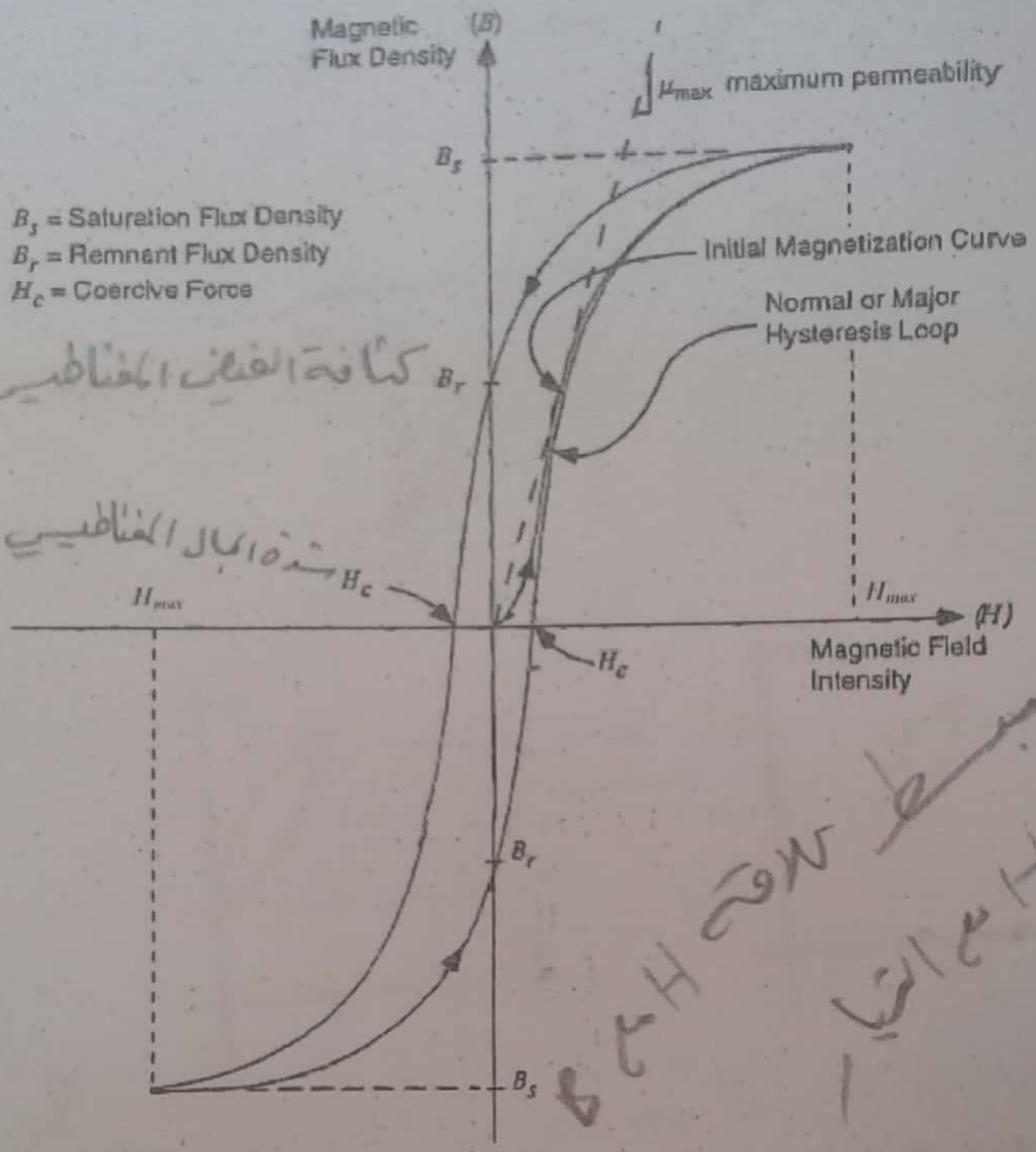
٢-٢-٣- عـروة البطـاء المغناطيسي:

لنعد إلى التجربة السابقة في الشكل (٢-٢) و لنتابع القياسات التي أجريناها عند رسم منحني المغنطة. وعنـدما نصـل إلى قيمة أعظمية لشدة المجـال المغناطيـسي H_{max} التي تقابل $B_{max}=B_{saturation}$ الشكل (٢-٥). نبدأ بعدها بإنقاص شدة المجـال H تـدريجياً وذلـك بإنقاص شدة التيار المار في الدارة حتى نصل إلى النقطة التي ينعدم عندها المجال المغناطيسي H=0 وتبقى كثافة الفيض المغناطيسي مساوية لـ B_r = Remnant Flux Density والتـي تسمى كثافة الفيض المغناطيسي المتبقي أو المغناطيسية المتبقيـة (Residual Magnetism). نـزيد بعدها قيمة المجال H في الاتجاه المعاكس وذلك بتغيير اتجاه التيار حتى نـصل إلـى النقطة التي تنعدم عنـدها كثافـة الفـيض أي B=0 وتُـدعى قيمـة المجـال المقابلـة $-H_c$ = Coercive Force بشدة المجال المغناطيسي اللازمة لإزالـة مغنطـة المـادة بالقـوة القسرية. وبمتابعة الزيادة بالاتجـاه المعاكس تبدأ B بالزيادة بالاتجـاه المعاكس حتى نـصل إلـى النقطـة التـي تـصبح عنـدها قيمـة H تـساوي $-H_{max}$ و التي تقابل $-B_{max} = -B_{saturation}$. إذا بدأنا بانقاص شدة المجـال المغناطيسي حتـى الـصفر سيـصل المنحي إلى النقطـة $-B_r$ حيث تكون H=0. نـزيد شدة المجال الممغنط H في الاتجاه الأول حتى نصل إلى النقطة H_c والتي عندها تنعدم كثافة السيالة أو الفيض B=0 وإذا تابعنا زيـادة المجـال المُمغنط بالإتجـاه الموجب نعود إلى النقطة H_{max} التـي تقابل $B_{max}=B_{saturation}$ و بهـذا نَحصل على المنحني المغـلق و الـذي يسمى عروة (أوحلقة) البطـاء (أو التعويـق) المغناطيسي Hysteresis[1] Loop .

---

(١)- أصل هذه الكلمة يوناني Ustéro و تعني أنا أتأخر. و هذا التأخير لا يعني تأخر في الزمن انما هو نـوع من مقاومة العنصر المنفعل للتزايد عندما يزداد السبب المؤثر عليه، و للتناقص عندما يتناقص الفعل المـؤثر و هكذا تؤدي هذه المقاومة للحصول على عدة قيم نتيجة تطبيق قيمة واحدة للفعل المؤثر. و تشبه هذه الحادثة حادثة تباطؤ المرونة لنابض يعاني من تشوهات دائمة.

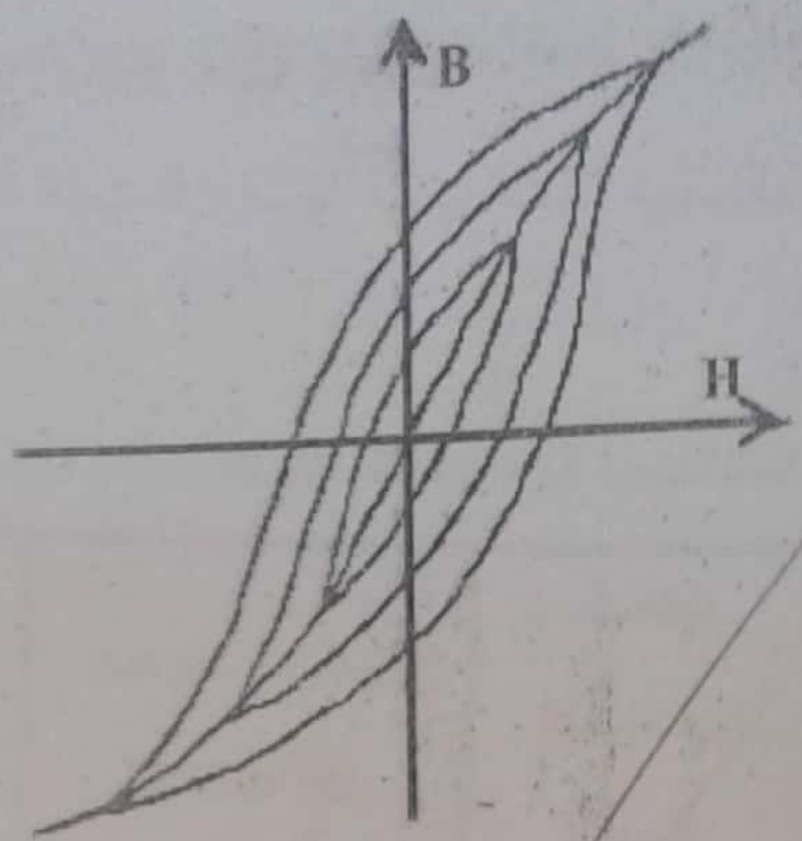
Scanned by CamScanner



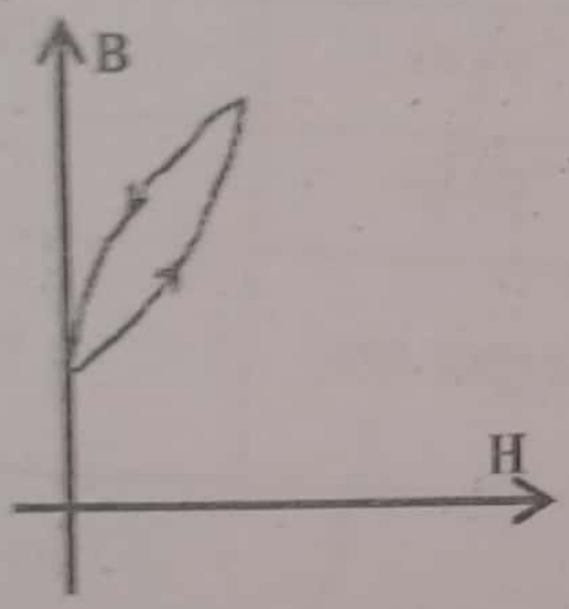
الشكل(٢-٥): عـــروة البطاء المغناطيسي

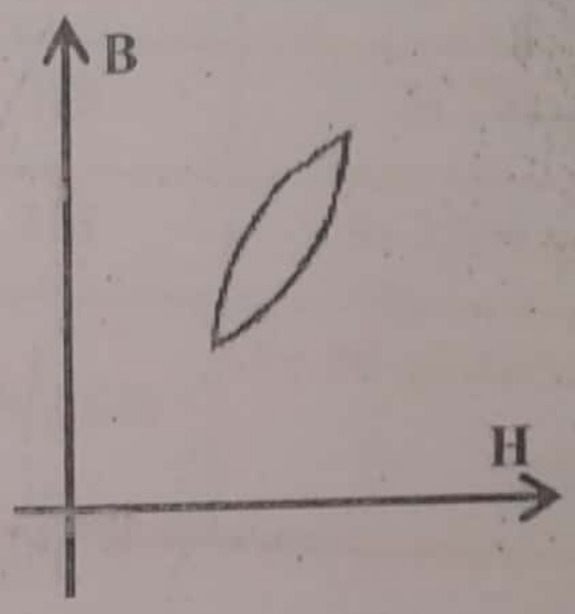
عند تطبيق تيـــار متناوب بدلاً من التيار المستمر سينشأ لدينا مجال مغناطيسي متناوب و بالتالي فان عـــروة البطاء المغناطيسي سوف تتكـــرر عـــدد من المرات في الثانية مساوياً لتردد التيار المستخدم. وتبقى القيمة الأعظمية لشدة المجال المغناطيسي H_{max} ثابتة خلال كل مرة تتكـــرر فيها العروة. يُلاحظ أنه عند استخدام قيـــم مختلفة للمجال المغناطيسي (أصـــغر من القيمة العظمى H_{max}) فإن منحنيات البطـــاء المغناطيسي تقع ضمن بعضها و تقع جميعها داخل العروة المحصورة بين القيمتين العظميين لشدة المجال المغناطيسي $\pm H_{max}$. كما يمكن الحصول على منحني التمغنط للمادة المستخدمة بوصل نهايات عـــروات التباطـــؤ مع بعضها البعض كما هو مبين في الشكل (٢-٦- a) (المنحني الذي يمر من المبـــدأ). و يحـــدد هـــذا المنحني مميزات تشغيل الآلات الكهربائيـــة و هـــو الذي يُعطى من قِـــبل الشركات الصانعة.

Scanned by CamScanner



(a)





(b)

الشكل (٢-٦): أشكال مختلفة من عُرى التباطؤ المغناطيسي

a)- عرى تباطؤ محددة بقيمتين لشدة المجال المغناطيسي متساويتين بالقيمة و متعاكستين بالاتجاه

b)- عرى تباطؤ محددة بقيمتين لشدة المجال المغناطيسي مختلفتين بالقيمة و بنفس الاتجاه

ملاحظات:

١- يُمكن الحصول على عُـرى تباطؤ تتحدد بقيمتين لشدة المجال المغناطيسي و ليس من الضروري أن تكون هاتان القيمتان متساويتين بالقيمة و متعاكستين بالاتجاه كما هو مبين في الشكل (٢-٦- b). إلا أننا درسنا الحالة الأولى ($-H_{max}$, H_{max}) المبينة على الشكلين (٢-٥) و (٢-٦- a) بشيء من التفصيل لأنها الأكثر شيوعاً و تحدث في عدد كبير من الآلات الكهربائية: محولات Transformers و منوبات Alternators و آلات تيار مستمر D.C Machines و ....

٢- يُستخدم من أجل العناصر التي تتعرّض في الآلات الكهربائية لتحريض مغناطيسي مُتغيّر (قلب المحولات، المتحرض في آلات التيار المستمر و المتناوب، قلب المغانط التي

Scanned by CamScanner

تعمل على التيار المتناوب) خليطة الفولاذ- سيليسيوم حيث يكون ضياع البطاء المغناطيسي صغيراً جداً. أما فيما يتعلق بالنفاذية المغناطيسية لهذه المادة فنلخصها في الجدول (٢-١) التالي:

الجدول (٢-١): الصفات المغناطيسية لبعض خلائط الفولاذ

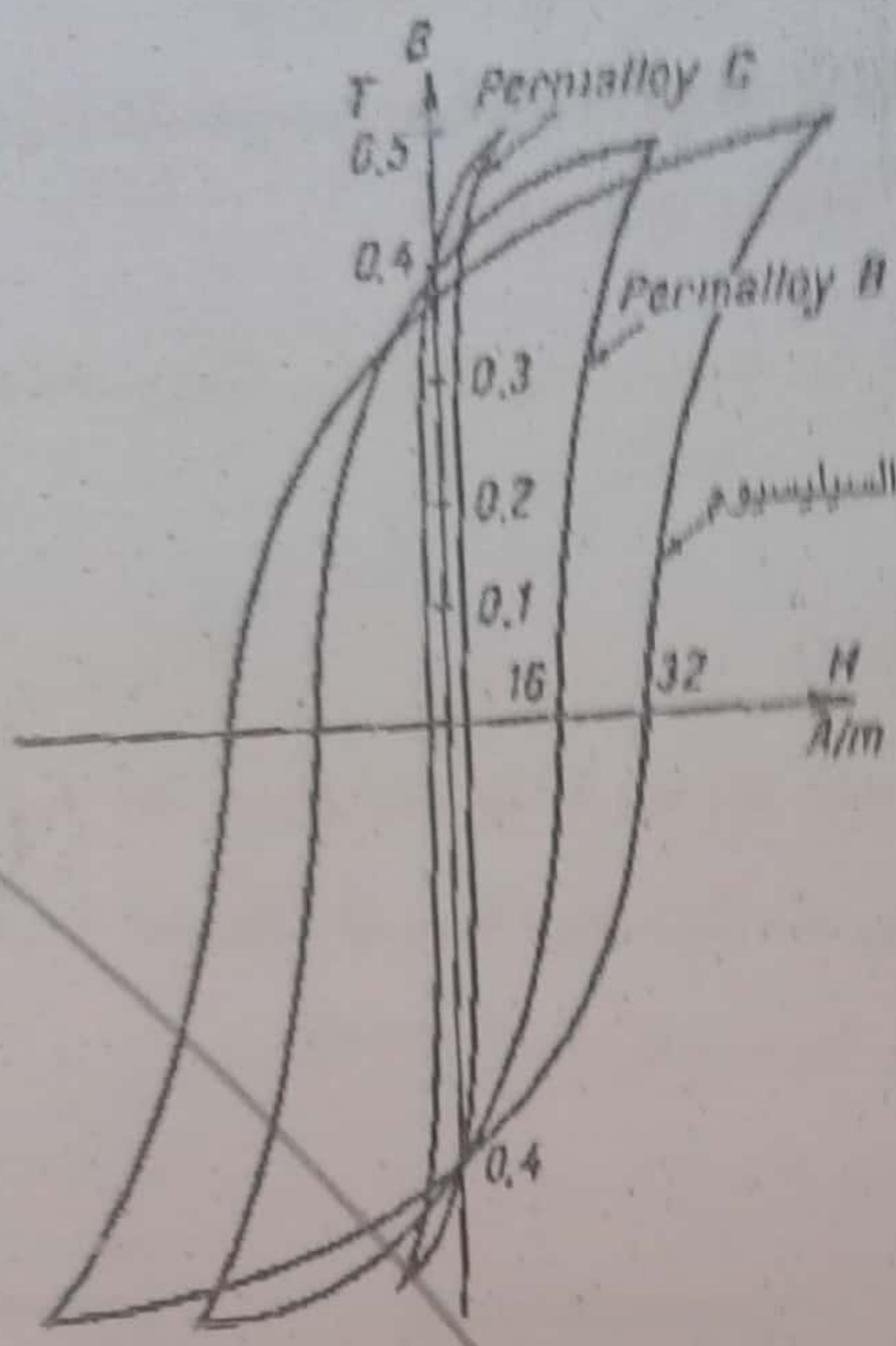
المادة	النفاذية المغناطيسية النسبية	المقاومة النوعية $\Omega.mm^2/m$	الضياع بالـ [Joules] في حلقة بطاء لكل m^3 من أجل B_m= 1 Tesla
فولاذ طري (صفائح عادية)	250	$(11\text{-}15).10^{-8}$	180
فولاذ يحوي Si 2%	300	40.10^{-8}	85
فولاذ يحوي Si 3,5%	350	60.10^{-8}	75
سبيكة حديد نيكل Fe-Ni الصنف الثاني	1000-2500	$(450\text{-}500).10^{-8}$	30

٣- يُستخدم من أجل الأجهزة الصغيرة (محولات الراديو، أجهزة القياس،...) سبائك الحديد- نيكل Fe-Ni ذات السعر المرتفع جداً، أما الاسماء الصناعية لها فهي:

- Anhyster D
- Perma X
- Permalloy B

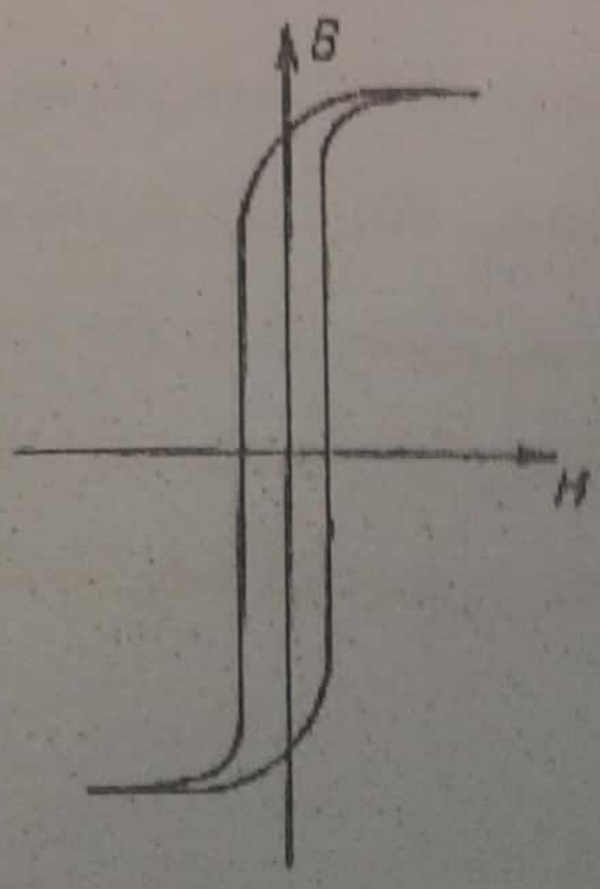
و من المهم معرفته هو أن عامل النفاذ المغناطيسي الأعظمي لهذه المواد (Fe-Ni) يحدث من أجل قيمة للحقل المغناطيسي أعلا من موافقتها السبائك السابقة، انظر الشكل (٢-٧) و الجدول (٢-١)، و ذلك لأن هذه السبائك تخضع بشكل عام أثناء عملها إلى حقل مغناطيسي مستمر مضافاً اليه حقلاً مغناطيسياً متناوباً، و بالتالي مهما كانت شدة الحقل المغناطيسي المستمر فانها لا تؤدي لتصغير النفاذية المغناطيسية بشكل كبير.

Scanned by CamScanner



الشكل (٢-٧): غـرى البطاء لسبائك حديدية مختلفة

٤- عنـدما يكون تـردد الحقـل المغناطيسي المتناوب كبيـراً يُستخدم معـدن الـ Ferrite الفرايت الطري رغم أن نفاذيتـه المغناطيسية ضعيفة و ذلك لأن المقاومة النوعيـة لهـذا المعـدن كبيرة و تؤدي لتصغير تيـارات فـوكو المتحرضـة فيـه. و الجـدير بالـذكر أن عـروة البطـاء المغناطيسي للفرايت قريبـة جـداً من شكل المستطيل كما هـو مبين في الشكل (٢-٨) و يُستفاد من هـذه الخاصية في تطبيقات هامـة جـداً في الهندسـة الالكترونية (الحاسبات في الـرادار ،...).



الشكل (٢-٨): عـروة البطاء لمادة الفرايت

Scanned by CamScanner

٢-٣ - قـوانين التحريض و القـوى الكهرومغناطيسية:

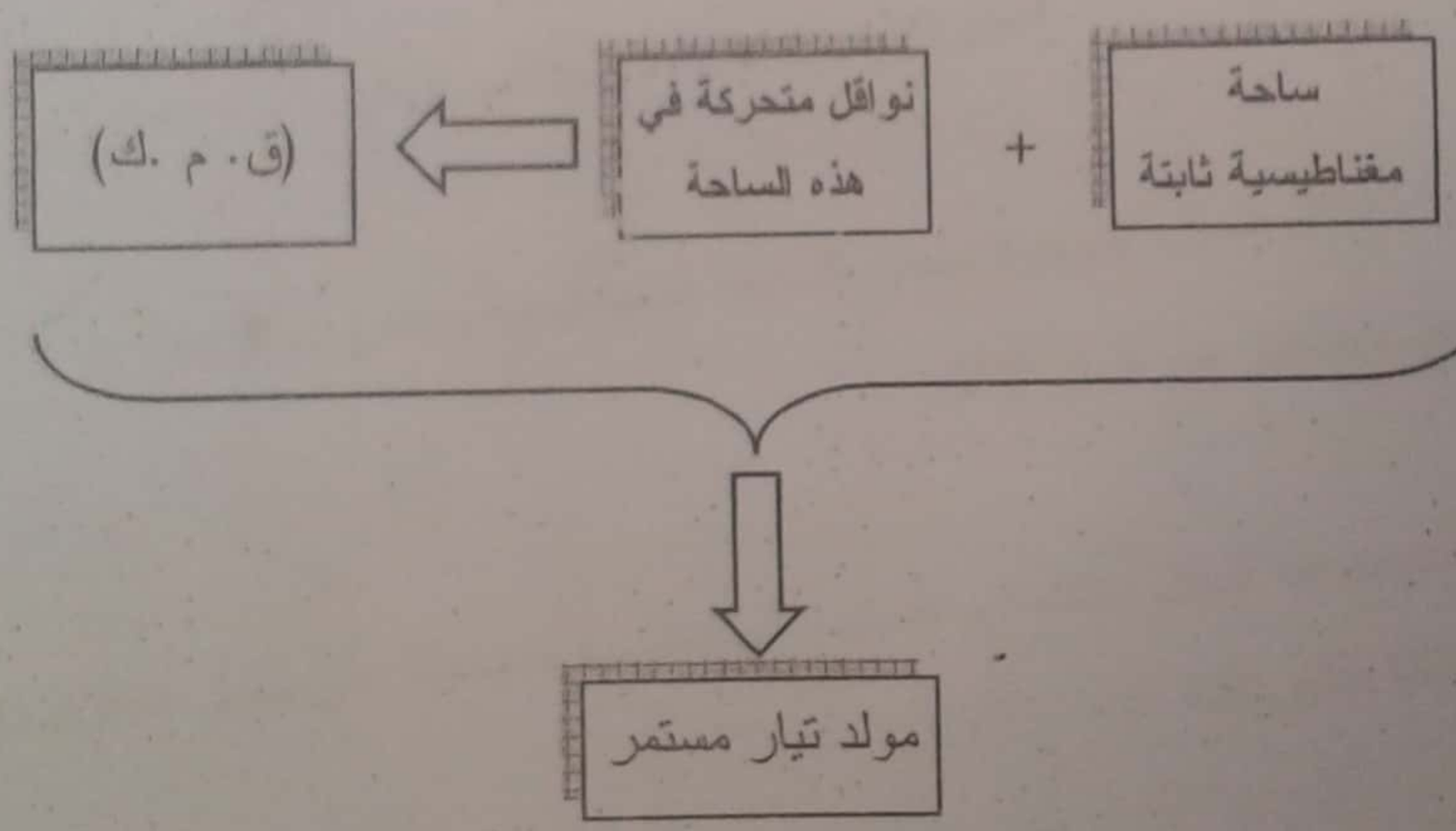
Laws of Electromagnetic Induction and Forces

٢-٣-١- قانـون فـرداي: Faraday's law

يُحـدد هذا القـانون 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 نواقـل متحركـة في ساحة مغناطيسية ثابتة، تسمى هذه القوة بالقوة المحركة الكهربائية الحركية، و هـذا هـو مبدأ عمل مولدات التيار المستمر الموضّح في الشكل (٢-٩).

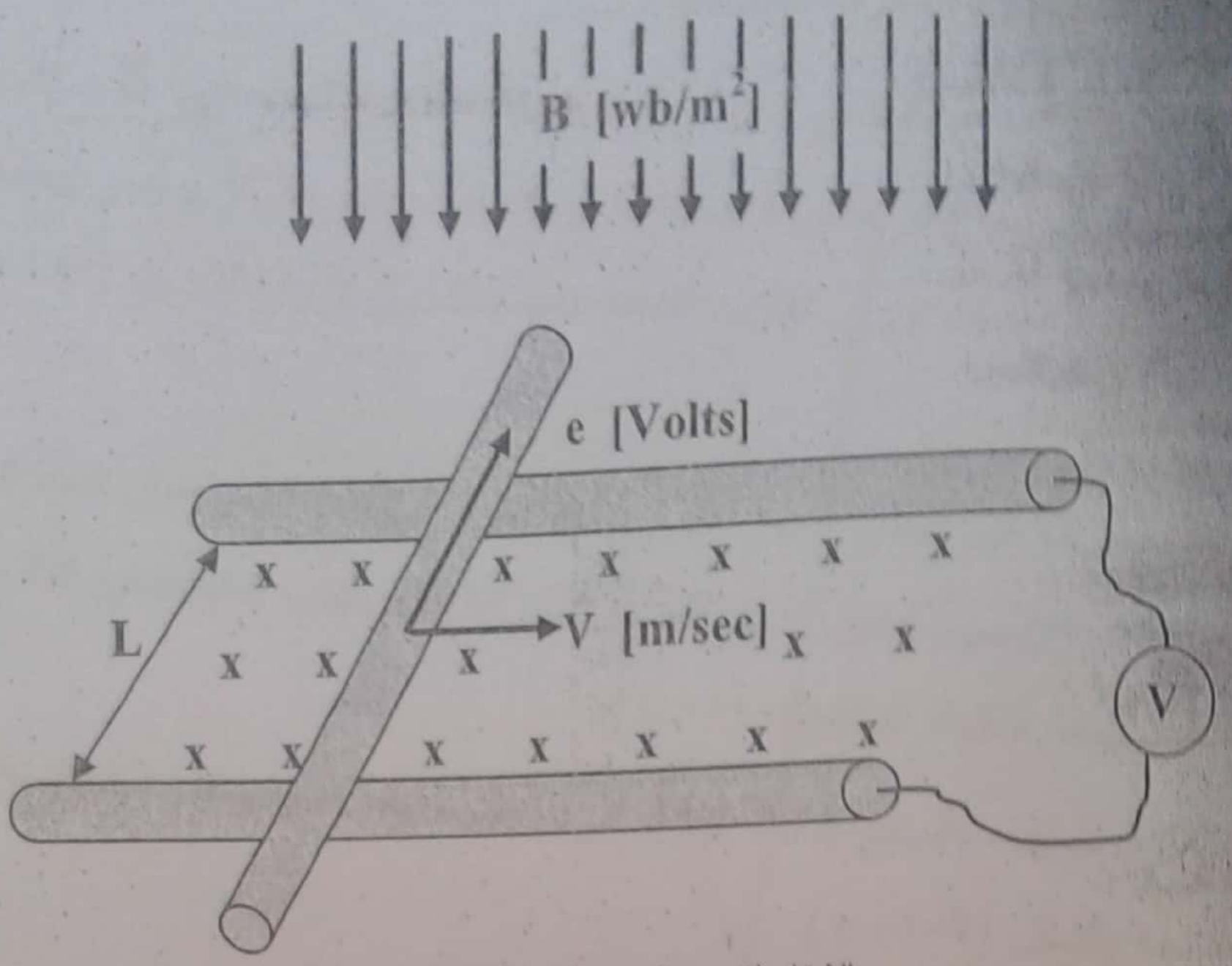


الشكل (٢-٩): مبدأ عمل مولدات التيار المستمر

لنفرض أنه لدينا سكتين معدنيتين ناقلتين متوازيتين متوضعتين ضمن ساحة مغناطيسية ثابتة تحريضها $B\ [Wb/m^2]$ كما هو موضّح بالشكل (٢- ١٠). و كان لدينا ناقل كهربـائي يتحرك بسرعة خطية $V\ [m/sec]$ على هاتين السكتين. تتولد في هذا الناقـل قـوة محركـة كهربائيـة (ق.م.ك) e ، حسب قانـون فـرداي، تعطى بالعلاقـة الآتيـة:

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

Scanned by CamScanner



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 المحركة الكهربائية e :

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

حيث α هي الزاوية بين شعاع التحريض وشعاع السرعة.

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

$$e = B.L.V \quad [V] \qquad (٢-٣)$$

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

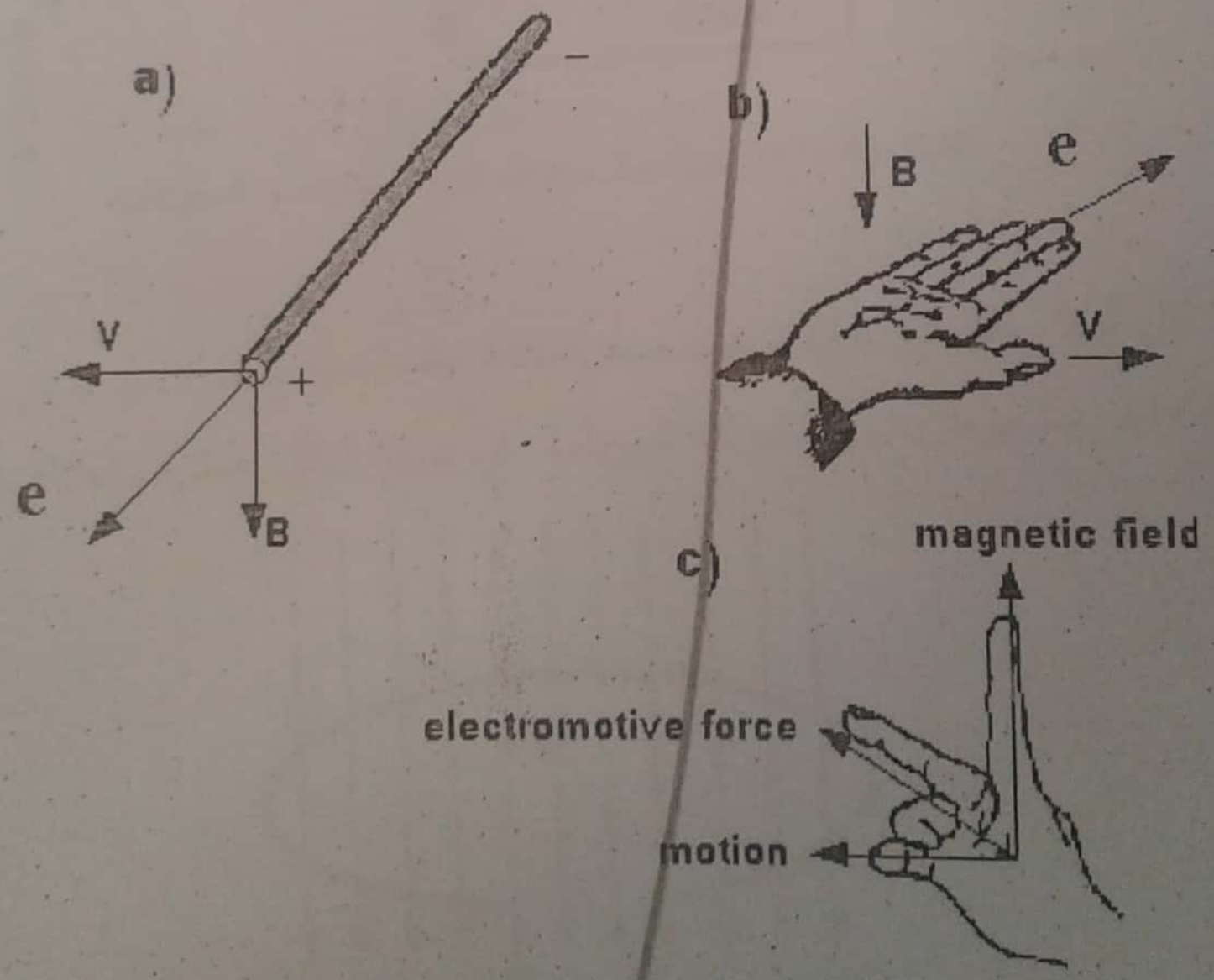
Scanned by CamScanner

– تحديد اتجاه القوة المحركة الكهربائية:

١- طريقة الجداء الشعاعي : إن اتجاه e هو اتجاه الجداء الشعاعي $\overline{V} \times \overline{B}$ وهذا الجداء عبارة عن شعاع لو نظرنا من رأسه لوجدنا شعاع السرعة $\overline{V}$ يدور لينطبق على الشعاع $\overline{B}$ بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة بحيث تكون الزواية أقل من (١٨٠ درجة)، الشكل (٢-١١- a) .

٢- طريقة اليد اليمنى: يُعتبر الفيض داخلاً إلى راحة اليد اليمنى وأن اتجاه السرعة الخطية باتجاه الإبهام فيكون اتجاه القوة المحرّكة الكهربائية المتولّدة في الناقل باتجاه الأصابع الأربعة الباقية، الشكل(٢-١١- b).

٣- طريقة الأصابع الثلاث لليد اليمنى: وهذه الطريقة مشابهة للطريقة السابقة وموضّحة بالشكل (٢-٩- c).

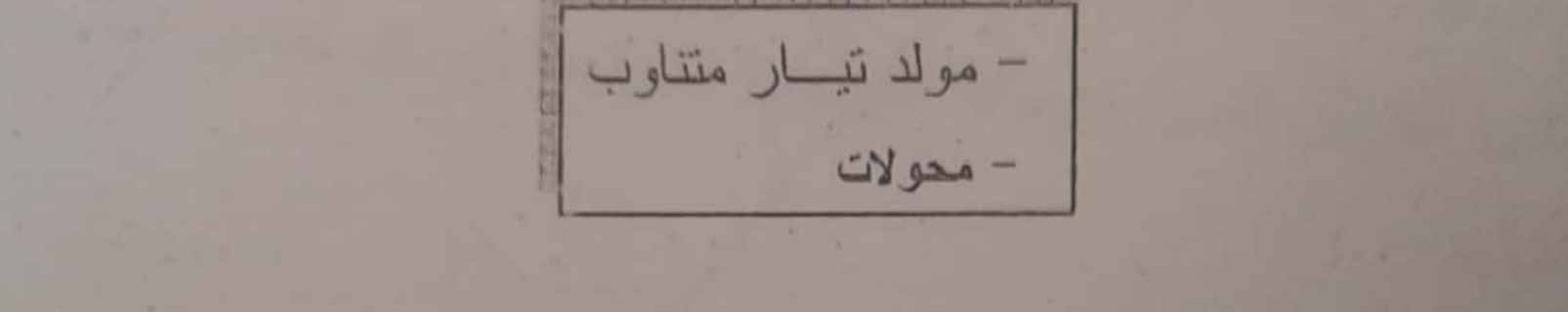


الشكل (٢-١١):طرق تحديد اتجاه القوة المحركة الكهربائية

Scanned by CamScanner

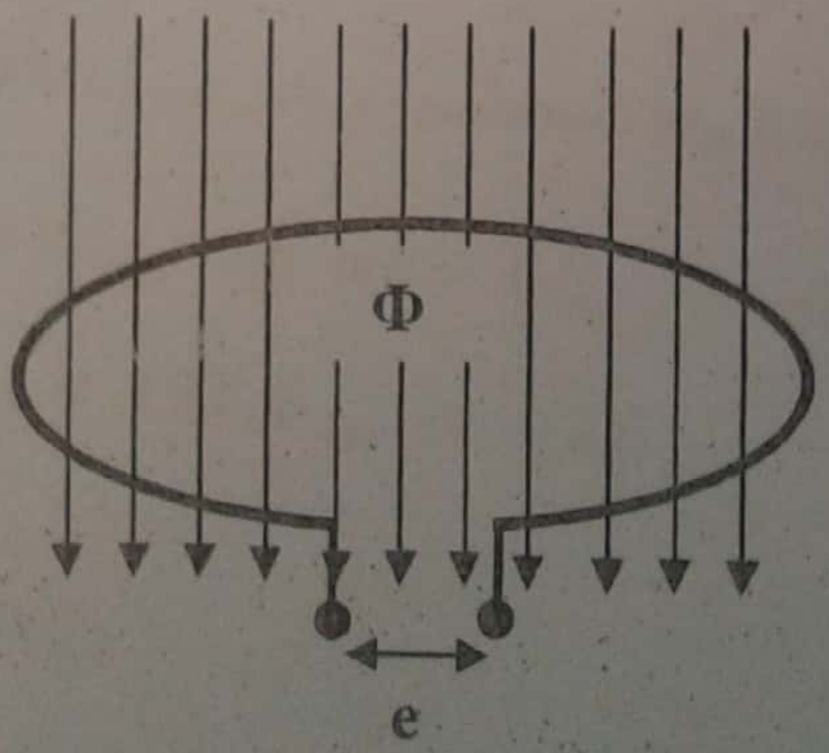
الظاهرة الثانيـــة :

تتلخص 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 المتحرضة، 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

إذا 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

Scanned by CamScanner

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

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

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

حيث:

ψ: الفيض المغناطيسي الكلي المتشابك مع الوشيعة.

Φ: الفيض المغناطيسي المتشابك مع لفة واحدة.

N: عدد لفات الوشيعة.

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

اذا كان الفيض المغناطيسي:

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

فإن:

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

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

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

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

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

و اذا احتوت الوشيعة على N لفة تكون القـــوة المحركة الكهربائية الكلية المتحرّضة بـ

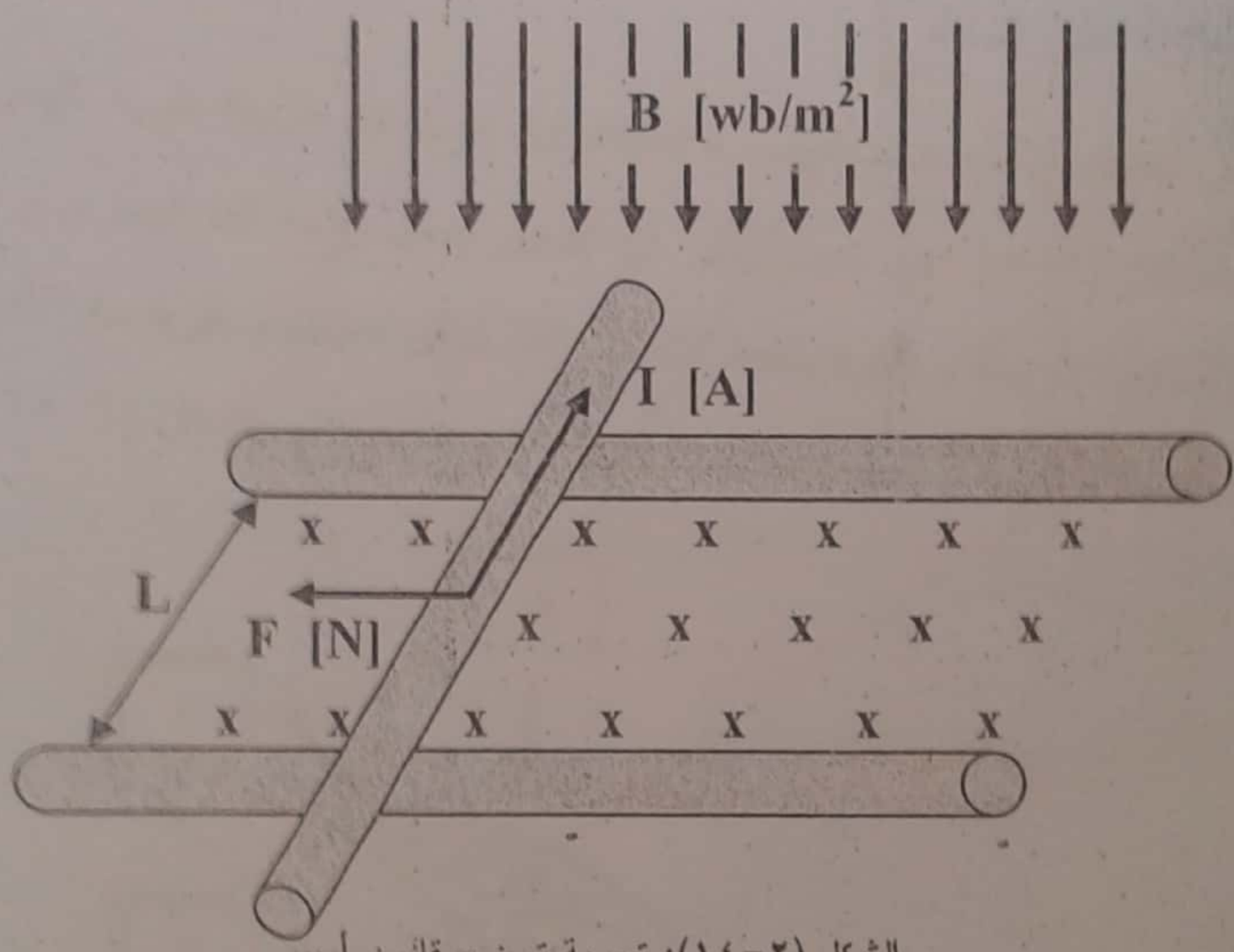
$$E = N . E_{rms} = 4,44 . N . f . \Phi_{max} \qquad (٢-١١)$$

Scanned by CamScanner

هو تردد السيالة المغناطيسية و يقدر بـ [Hz] و E_{rms} هي القيمة الفعالة (المنتجة) للقوة المحركة الكهربائية.

٢-٣-٢- قانون أمبير: Ampere's law

تؤثر على سلك ناقل يمر فيه تيار I [A] و موجود في ساحة مغناطيسية ثابتة B [Wb/m^2] قوة ميكانيكية، كما هو موضّح في الشكل (٢-١٤)، تُعطى بالعلاقة (٢-١٢).



الشكل (٢-١٤): تجربة توضح قانون أمبير

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

حيث:

L : جزء من طول السلك الناقل الذي يُطابق اتجاهه اتجاه التيار الواقع تحت تأثير الساحة المغناطيسية الثابتة.

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

Scanned by CamScanner

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

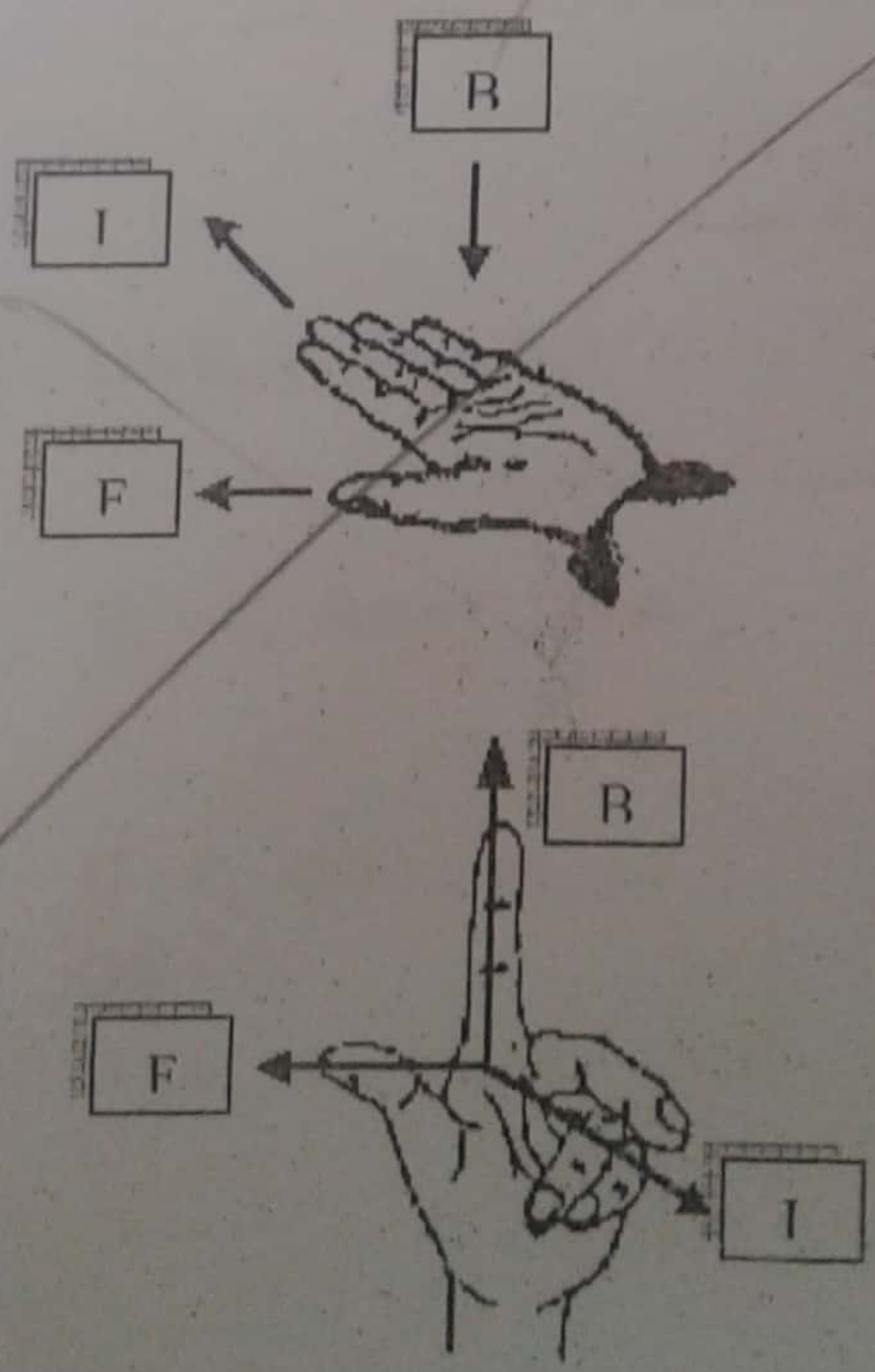
حيث γ هي الزاوية بين شعاعي التحريض المغناطيسي و التيـــار الكهربائي.

عند تعـــامد الشعاعين المذكـــورين تصبح هذه القـــوة الميكانيكية مساوية إلى:

$$F = B.I.L \quad [N] \qquad (٢-١٤)$$

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

يتم تحديد اتجاه هـــذه القـــوة الميكانيكية باستخدام طريقة اليـــد اليسرى كمـــا هـــو موضح بالشكل (٢-١٥-a). حيث يُعتبر أن الفيض يدخل راحة اليد اليسرى و يكـــون التيـــار باتجاه الأصابع الأربعة و القوة باتجاه الابهام. كما يُمكن استخدام طريقـــة الأصابع الثلاث لليد اليسرى و هـــذه الطريقة مشابهة للطريقة السابقة و موضحة في الشكل (٢-١٥-b).

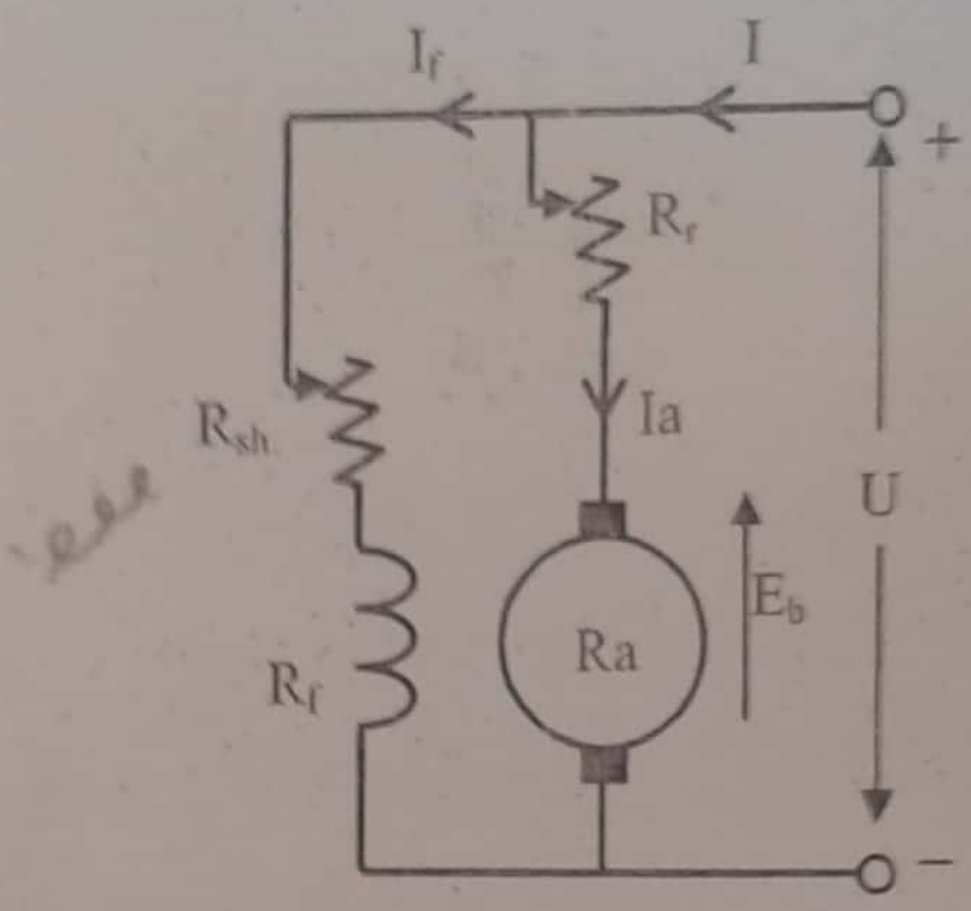


الشكل (٢-١٥):طرق تحديد اتجاه القوة الميكانيكية
a)- طريقة اليد اليسرى b)-طريقة الأصابع الثلاث لليد اليسرى

Scanned by CamScanner

٩-٣-٢- المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج التفرعي و المستقل:

يبين الشكل (٩-١) الدارة الكهربائية المكافئة لمحرك تيار مستمر تفرعي حيث توصل مع ملف التهييج مقاومة R_{sh} للتنظيم وتوصل مقاومة ثانية R_r على التسلسل مع المتحرّض لتخفيف الصدمة الكهربائية عند الإقلاع، وتستعمل أيضاً كمقاومة للتنظيم.



الشكل (٩-١): الدارة الكهربائية المكافئة لمحرك تيار مستمر تفرعي

بتطبيق قانون كيرشوف الثاني على دارة المحرك نجد:

$$U = E_b + I_a (R_a + R_r) \quad (٩-٦)$$

تُعطى القوة المحركة الكهربائية العكسية للمحرك بالعلاقة:

$$E_b = C_e . \Phi . n = C_m . \Phi . \omega \quad (٩-٧)$$

بتعويض (٩-٧) في (٩-٦) نجد:

$$\left.\begin{aligned} & U = C_e . \Phi . n + I_a (R_a + R_r) \\ & OR \\ & U = C_m . \Phi . \omega + I_a (R_a + R_r) \end{aligned}\right\} \quad (٩-٨)$$

حيث:

Scanned by CamScanner

C_e : الثابت الكهربائي للآلة.

C_m : الثابت الميكانيكي للآلة.

انطلاقاً من العلاقـــة (٩-٨) نجـــد:

$$\left.\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{I_a (R_a + R_r)}{C_e \cdot \Phi} \\ &\text{OR} \\ \omega &= \frac{U}{C_m \cdot \Phi} - \frac{I_a (R_a + R_r)}{C_m \cdot \Phi} \end{aligned}\right\} \qquad (٩-٩)$$

تُمثل العلاقـــة (٩-٩) العلاقة العامة للمميزات الكهروميكانيكية لمحرّكات التيار المستمر ذات التهييج المستقل و التفرعي. يُمكن أن نعتبر $\Phi \approx \text{const}$ في هذا النوع من المحركات وذلك عند جهد ثابت ومقاومة ثابتة لـــدارة التهييـــج.

اذا كانت $R_r = 0$ نحصل على مستقيم يمثل المميزة الكهروميكانيكية الطبيعية حيـــث يزداد ميل هذه المميزة مع ازدياد التيار I_a. أما في حال وجود المقاومة R_r فاننا نحصل على حزمة مستقيمات تُمثل المميزات الكهروميكانيكية الاصطناعية و التي تكـــون أكثر ميـــلاً (أقل قساوة) من المميزة الطبيعية و ذلك تبعاً لقيمة R_r. تنطلق جميع الممـــزات الكهروميكانيكيـــة، الطبيعية و الاصطناعية، من نقطة واحدة على محور السرعة هي n_0 (أو ω_0) و التي تُمثل سرعة المحرّك على فراغ (في الحالـــة المثاليـــة أي عندما $I_a = 0$) و التي تساوي:

$$n_0 = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} \quad , \quad \omega_0 = \frac{U}{C_m \cdot \Phi} \qquad (٩-١٠)$$

أما الحد الثاني من الطـــرف الأيمن للعلاقة (٩-٩) فيسمى هبـــوط السرعة و هو يساوي:

$$\Delta n = \frac{I_a (R_a + R_r)}{C_e \cdot \Phi} \quad , \quad \Delta\omega = \frac{I_a (R_a + R_r)}{C_m \cdot \Phi} \qquad (٩-١١)$$

تصبح معادلة المميـــزات الكهروميكانيكيـــة معطية بالشكل:

$$\left.\begin{aligned} n &= n_0 - \Delta n \\ &\text{OR} \\ \omega &= \omega_0 - \Delta\omega \end{aligned}\right\} \qquad (٩-١٢)$$

Scanned by CamScanner

تعطى علاقة عزم المتحرّض بالعلاقة:

$$\left.\begin{aligned} T_a &= C_m.\Phi.I_a \\ \Rightarrow I_a &= \frac{T_a}{C_m.\Phi} \end{aligned}\right\} \qquad (٩-١٣)$$

بتبديل قيمة التيار I_a من العلاقة (٩-١٣) في العلاقة (٩-٩) نجد:

$$\left.\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e.\Phi} - \frac{T_a(R_a+R_r)}{C_m.C_e.\Phi^2} \\ &\text{OR} \\ \omega &= \frac{U}{C_m.\Phi} - \frac{T_a(R_a+R_r)}{C_m{}^2.\Phi^2} \end{aligned}\right\} \qquad (٩-١٤)$$

وهي المعادلة العامة للمميزات الميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل و التفرعي.

نحصل على المميزة الميكانيكية الطبيعية عندما $R_r = 0$ حيث يزداد ميل هذه المميزة مع ازدياد العزم T_a. أما في حال وجود المقاومة R_r فاننا نحصل على حزمة مستقيمات تمثل المميزات الميكانيكية الاصطناعية و التي تكون أكثر ميلاً (أقل قساوة) من المميزة الطبيعية و ذلك تبعاً لقيمة R_r. تنطلق أيضاً جميع المميزات الميكانيكية من نقطة واحدة على محور السرعة هي n_0 (أو ω_0) المعطية بالعلاقة (٩-١٠).

يمثل الحد الثاني من الطرف الأيمن للعلاقة (٩-١٤) هبوط السرعة و هو يساوي:

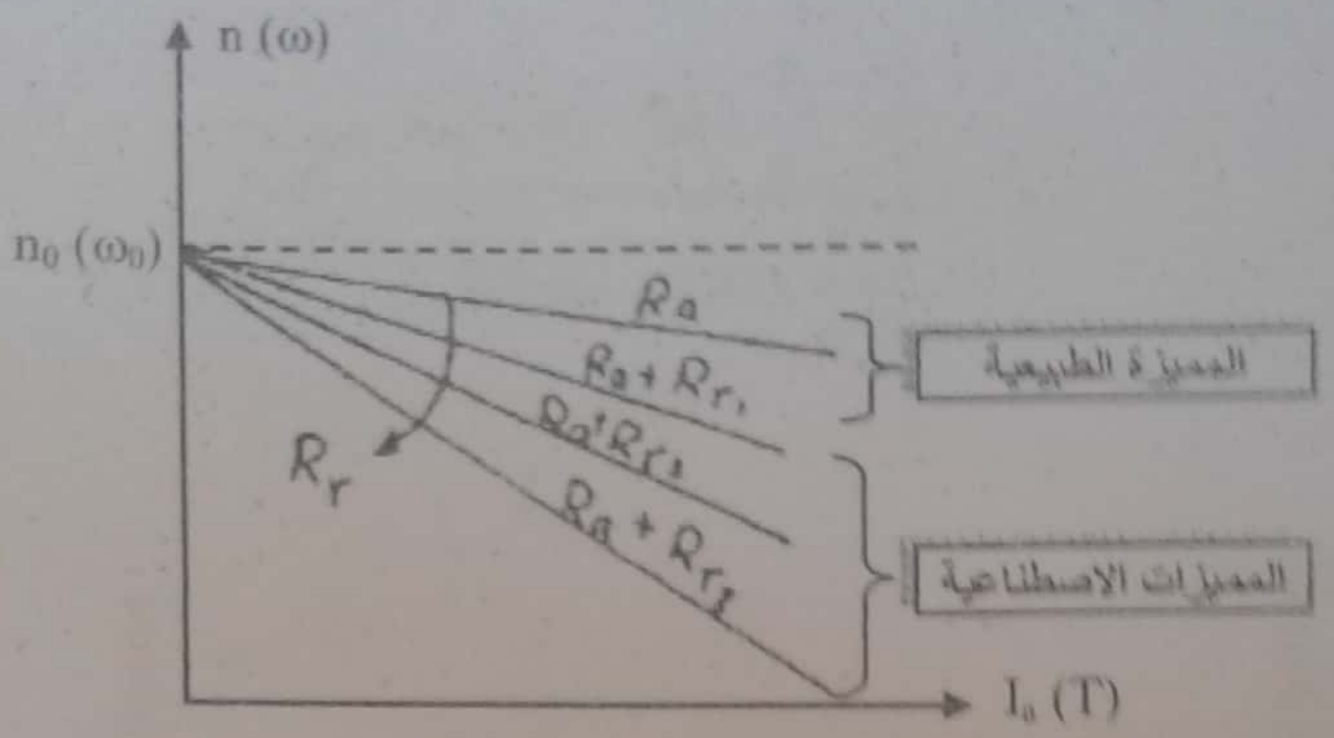
$$\Delta n = \frac{T_a(R_a+R_r)}{C_m.C_e.\Phi^2} \quad , \quad \Delta\omega = \frac{T_a(R_a+R_r)}{C_m{}^2.\Phi^2} \qquad (٩-١٥)$$

فتصبح معادلة المميزات الميكانيكية معطية بالشكل:

$$\left.\begin{aligned} n &= n_0 - \Delta n \\ &\text{OR} \\ \omega &= \omega_0 - \Delta\omega \end{aligned}\right\} \qquad (٩-١٧)$$

يبين الشكل (٩-٢) الشكل العام للمميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية الطبيعية و الاصطناعية لمحرك تيار مستمر ذي تهييج تفرعي أو مستقل.

Scanned by CamScanner



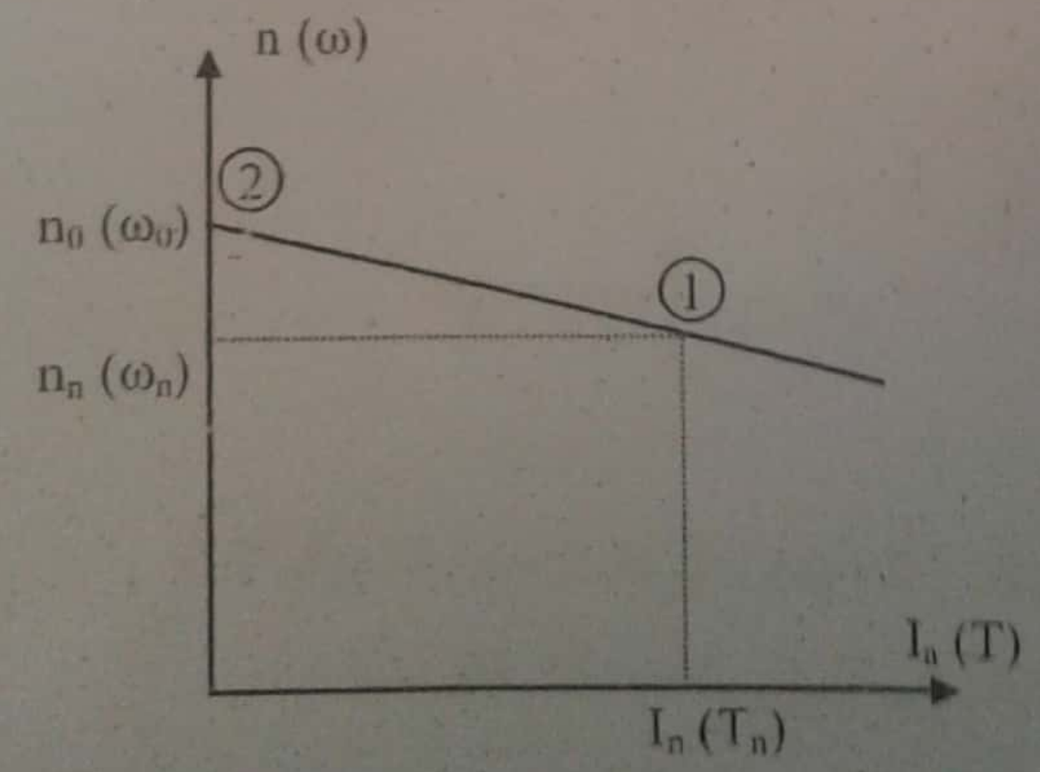
الشكل (٩-٢): الشكل العام للمميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية الطبيعية و الاصطناعية لمحرك تيار مستمر ذي تهييج تفرعي أو مستقل

٩-٣-٢-١- انشاء المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج التفرعي و المستقل:

١- **المميزة الطبيعية**: بما أن هذه المميزة هي عبارة عن مستقيم فيكفي معرفة إحداثيات نقطتين لإنشائها بيانياً، الشكل (٩-٣). يمكن أن تكون النقطة الأولى هي:

(I_n, n_n) أو (I_n, ω_n): للمميزة الكهروميكانيكية

(T_n, n_n) أو (T_n, ω_n): للمميزة الميكانيكية



الشكل (٩-٣): انشاء المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية الطبيعية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج التفرعي و المستقل

Scanned by CamScanner

يُمكن استنتاج هذه النقطة بسهولة من مُعطيات المحرك الاسمية حيث يُمكن حساب العزم الاسمي من إحدى العلاقتين التاليتين:

$$\left.\begin{array}{l} T_n[N.m] = 9{,}55\,\dfrac{P_n}{n_n} \\ T_n[kg.m] = 0{,}975\,\dfrac{P_n}{n_n} \end{array}\right\} \qquad (٩-١٨)$$

حيث تُقدر P_n بالـ [W] و n بالـ [r.p.m]

أما النقطة الثانية فهي تلك المقابلة للسرعة على فراغ و هي مشتركة بين المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية (الطبيعية و الاصطناعية): $(0, n_0)$ أو $(0, \omega_0)$

يُمكن استنتاجها من العلاقة (٩-١٠) كما يلي:

$$\left.\begin{array}{l} n_0 = \dfrac{U}{C_e.\Phi}\ , \\ E_n = U - I_n.R_a = Ce.\Phi.n_n \ \Rightarrow \\ Ce.\Phi = \dfrac{U - I_n.R_a}{n_n} \ \Rightarrow \\ n_0 = \dfrac{U}{U - I_n.R_a} n_n \end{array}\right\} \qquad (٩-١٩)$$

و بنفس الطريقة نجد أن:

$$\omega_0 = \frac{U}{U - I_n.R_a}\omega_n \qquad (٩-٢٠)$$

لرسم هذه المميزات يجب معرفة قيمة المقاومة R_a، ولكن اللوحة الاسمية للمحرك لا تُعطي عادة هذه المقاومة، لذلك يتم تحديدها استناداً إلى كون الضياعات الكلية في

Scanned by CamScanner

المحرك تساوي ضعف الضياعات النحاسية في مقاومة المتحرض وذلك في حالة المردود الأعظمي أي:

$$\left.\begin{aligned} &\Sigma\Delta P = 2I^2.R_a = P_{in} - P_{out} = P_{in}(1-\eta_{max}); \\ &P_{in} = U_n I \\ &\Rightarrow \Sigma\Delta P = U_n I\,(1-\eta_{max}) = 2I^2.R_a \\ &\Rightarrow R_a = \frac{U_n}{2.I}(1-\eta_{max}) = 0{,}5.(1-\eta_{max})\frac{U_n}{I} \end{aligned}\right\} \quad (٩-٢١)$$

<u>ملاحظـــة:</u> يُمكن و بشكل تقريبي إعتبار أن المـــردود الأعظمي يحـــصل عنـــد المـــردود الاسمي و بالتالي يُمكننا في هـــذه الحالـــة حساب مقاومة المتحرّض من العلاقـــة التاليـــة:

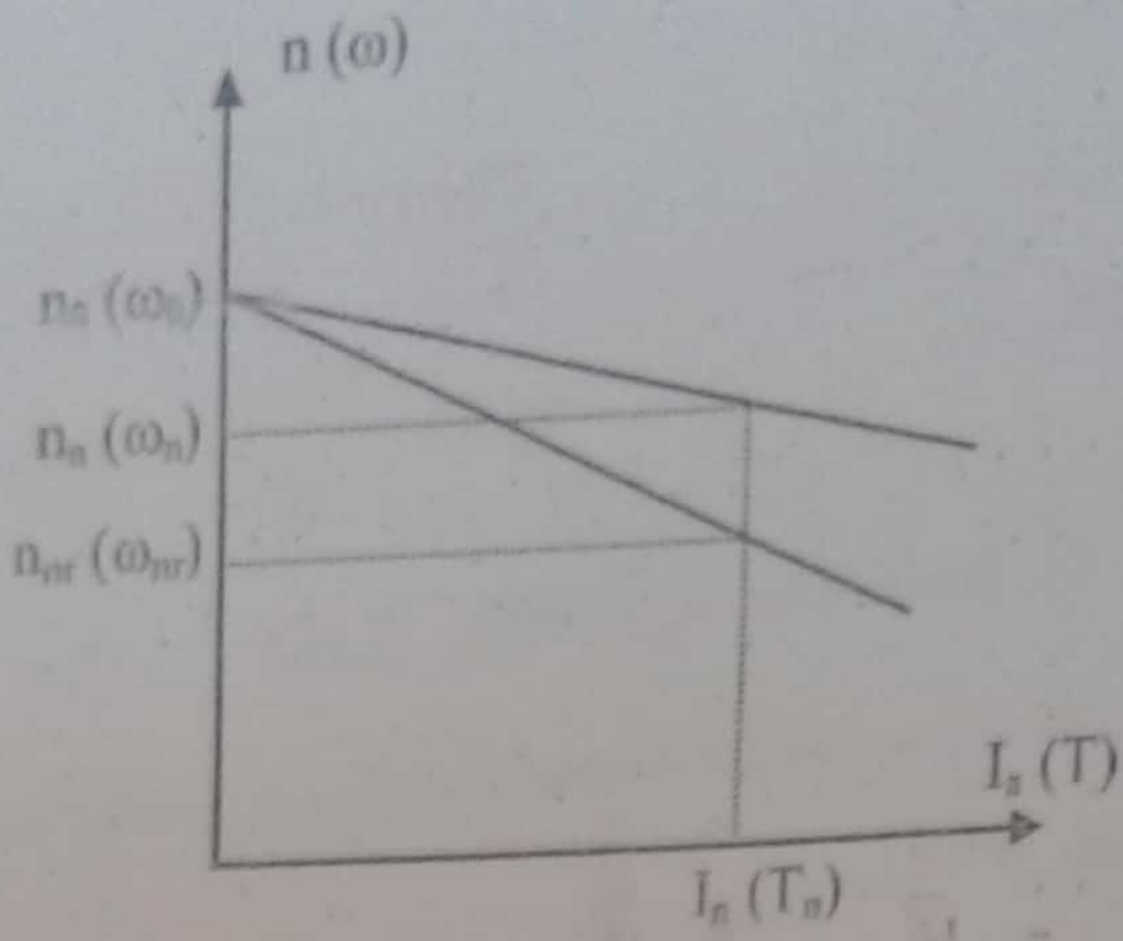
$$R_n = 0{,}5.(1-\eta_n)\frac{U_n}{I_n}$$

٢- المميـــزات الاصطناعيـــة:

بما أن هـــذه المميزات هـــي عبـــارة عن مستقيمات فيكفي أيضاً معرفـــة إحـــداثيات نقطتين لإنشائها بيانياً، الشكل (٩-٤). تكون النقطة الأولى هي تلك المقابلـــة للـــسرعة علـــى فـــراغ $(0, n_0)$ أو $(0, \omega_0)$. أما النقطة الثانية فيمكن ايجادها عند الحمل الاســـمي أي مـــن أجـــل ($I = I_n$, $T = T_n$). نجـــد من العلاقتـــين (٩-١٩)و (٩-٢٠) أن الـــسرعة علـــى المميزات الاصطناعية عند الحمل الاسمي تساوي إلى:

$$\left.\begin{aligned} n_{nr} &= n_0\left[1 - \frac{I_n(R_a + R_r)}{U}\right] \\ \omega_{nr} &= \omega_0\left[1 - \frac{I_n(R_a + R_r)}{U}\right] \end{aligned}\right\} \quad (٩-٢٢)$$

Scanned by CamScanner



الشكل (٩- ٤): انشاء المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية الاصطناعية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج التفرعي و المستقل

مثال

يملك محرك تيار مستمر ذو تهييج تفرعي المُعطيات الاسمية التالية:

$$P_n = 18\ kW,\ U_n = 220\ V,\ I_n = 101\ A,\ n_n = 800\ r.p.m,\ Ra = 0{,}242\ \Omega$$

المطلوب:

١- رسم المميزة الميكانيكية الطبيعية.

٢- رسم المميزة الاصطناعية من أجل $R_r = 0{,}97\ \Omega$.

الحل:

١- لرسم المميزة الطبيعية يمكن إيجاد نقطتين من المنحني الطبيعي إحداهما توافق عمل المحرك على فراغ ($n = n_0\ ,\ T = 0$).

سرعة دوران المحرك على فراغ :

$$n_0 = n_n \frac{U_n}{U_n - I_n R_a} = 800 \frac{220}{220 - 101 \times 0{,}242} = 900\ r.p.m$$

فالنقطة الأولى هي: $(0\ ,\ 900)$

أما النقطة الثانية فهي عند الحمولة الاسمية أي (T_n, n_n) حيث:

Scanned by CamScanner

$$T_n[N.m] = 9,55\ \frac{P_u}{n_n} = 9,55\ \frac{18\times10^3}{800} = 214,87$$

$$T_n[kg.m] = 0,975\ \frac{P_u}{n_n} = 0,975\ \frac{18\times10^3}{800} = 21,9$$

اذاً النقطة الثانية هي: (800 , 21,9)

نقوم برسم المميزة الطبيعية للمحرّك وهي مستقيم يمر من هاتين النقطتين كما هو مبين في الشكل (٩-٥).

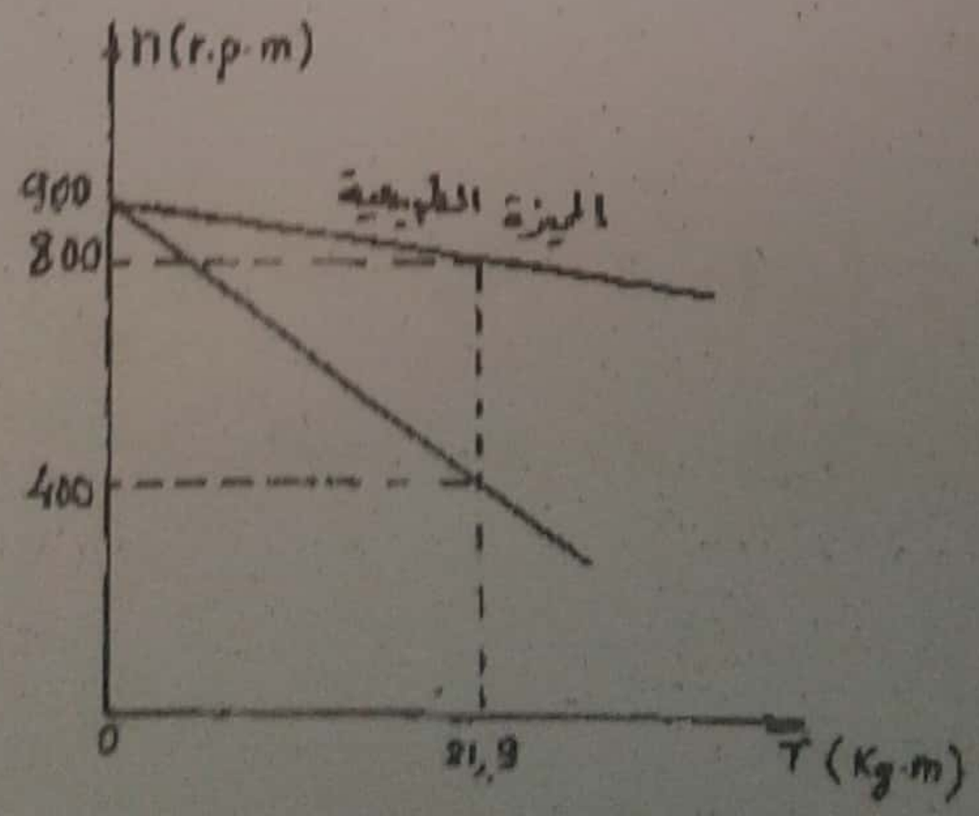
٢- لرسم المميزة الاصطناعية يلزمنا أيضاً نقطتين و بما النقطة الأولى المشتركة، و التي تنبعث منها كافة المميزات الميكانيكية للمحرّك، معروفة و هي (900 , 0) اذا يبقى علينا معرفة النقطة الثانية التي تُأخذه عادةً عند الحمولة الاسمية أي (T_n, n_{nr}) حيث:

$$n_{nr} = n_0\left[1 - \frac{I_n\,(R_a + R_r)}{U}\right]$$

$$n_{nr} = 900\left[1 - \frac{101(0,242+0,97)}{220}\right] = 400\ \text{r.p.m}$$

النقطة الثانية هي: (400 , 21,9)

نقوم برسم هذه المميزة الاصطناعية للمحرّك وهي مستقيم يمر من هاتين النقطتين كما هو مبين في الشكل (٩-٥):



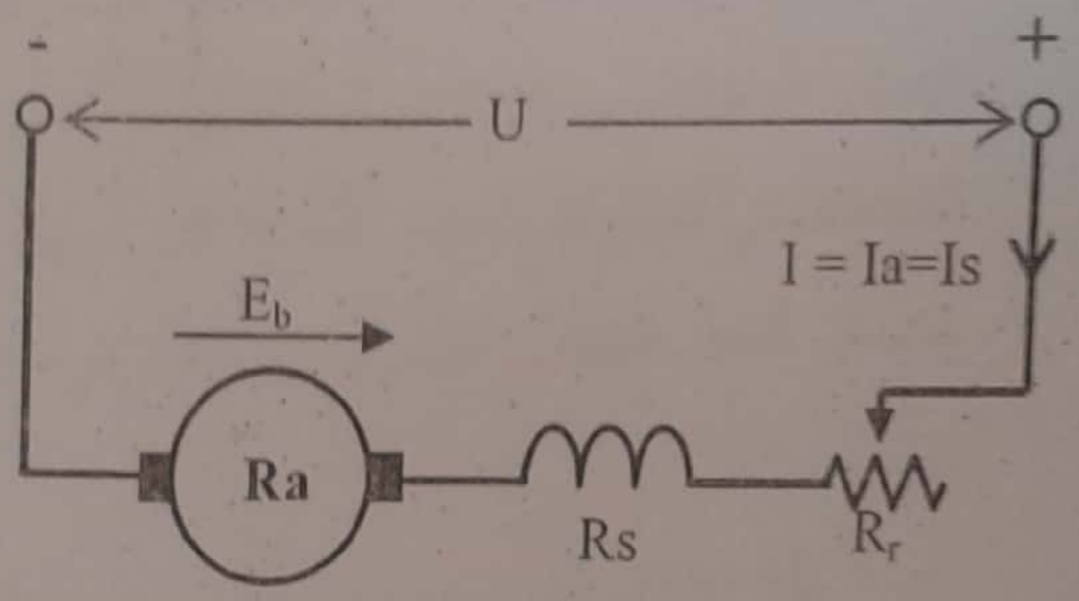
الشكل (٩-٥): رسم المميزة الطبيعية و المميزة الاصطناعية للمحرّك التفرعي في المثال السابق

Scanned by CamScanner

٩-٣-٣- المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج التسلسلي:

تتميز هذه المحركات بعزم إقلاعها الكبير وبسرعتها الكبيرة عند الحمولات الصغيرة- لذا فهي تُستعمل في الرافعات وآليات الجر.

يبين الشكل (٩-٦) الدارة الكهربائية المكافئة لمحرك تيار مستمر ذو تهييج تسلسلي حيث توصل مقاومة الإقلاع و التنظيم R_r على التسلسل مع ملف المتحرض.



الشكل (٩-٦):

بتطبيق قانون كيرشوف على دارة المحرك نجد:

$$U = E_b + I_a (R_a + R_s + R_r) \qquad (٩-٢٣)$$

تُعطى القوة المحركة الكهربائية العكسية للمحرك بالعلاقة:

$$E_b = C_e . \Phi . n = C_m . \Phi . \omega \qquad (٩-٢٤)$$

بتعويض (٩-٢٤) في (٩-٢٣) نجد:

$$\left.\begin{aligned} &U = C_e . \Phi . n + I_a (R_a + R_s + R_r) \\ &OR \\ &U = C_m . \Phi . \omega + I_a (R_a + R_s + R_r) \end{aligned}\right\} \qquad (٩-٢٥)$$

انطلاقاً من العلاقة (٩-٢٥) نجد:

Scanned by CamScanner

$$\left.\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e.\Phi} - \frac{I_a(R_a+R_s+R_r)}{C_e.\Phi} \\ &\text{OR} \\ \omega &= \frac{U}{C_m.\Phi} - \frac{I_a(R_a+R_s+R_r)}{C_m.\Phi} \end{aligned}\right\} \qquad (٩-٢٦)$$

تمثل العلاقة (٩-٢٦) العلاقة العامة للمميزات الكهروميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج التسلسلي و هي علاقة غير خطية ومعقدة نسبياً و ذلك نظراً لتعلق قيمة الفيض المغناطيسي بقيمة تيار المتحرّض. من أجل تبسيط الحسابات يتم إهمال الإشباع المغناطيسي للمحرّك واعتبار العلاقة التي تربط بين الفيض وتيار المتحرّض خطية في مجال العمل النظامي للمحرّك، وانطلاقاً من ذلك نجد:

$$\Phi = \alpha . I_a \qquad (٩-٢٧)$$

وبالتالي يمكننا كتابة علاقة العزم بالشكل:

$$\left.\begin{aligned} T &= C_m.\Phi.I_a = C_m.\alpha.I_a^2 \\ &\Rightarrow I_a = \sqrt{\frac{T}{C_m.\alpha}} \end{aligned}\right\} \qquad (٩-٢٨)$$

و بتعويض قيمة Φ من العلاقة (٩-٢٧) و قيمة I_a من (٩-٢٨) في العلاقة (٩-٢٦) نجد:

$$\left.\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e.\alpha.\sqrt{\frac{T}{\alpha.C_m}}} - \frac{R_a+R_s+R_r}{C_e.\alpha} \\ &\text{OR} \\ \omega &= \frac{U}{C_m.\alpha.\sqrt{\frac{T}{C_m\,\alpha}}} - \frac{R_a+R_s+R_r}{C_m.\alpha} \end{aligned}\right\} \qquad (٩-٢٩)$$

Scanned by CamScanner

وهي المعادلة العامة للمميزات الميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج التسلسلي.

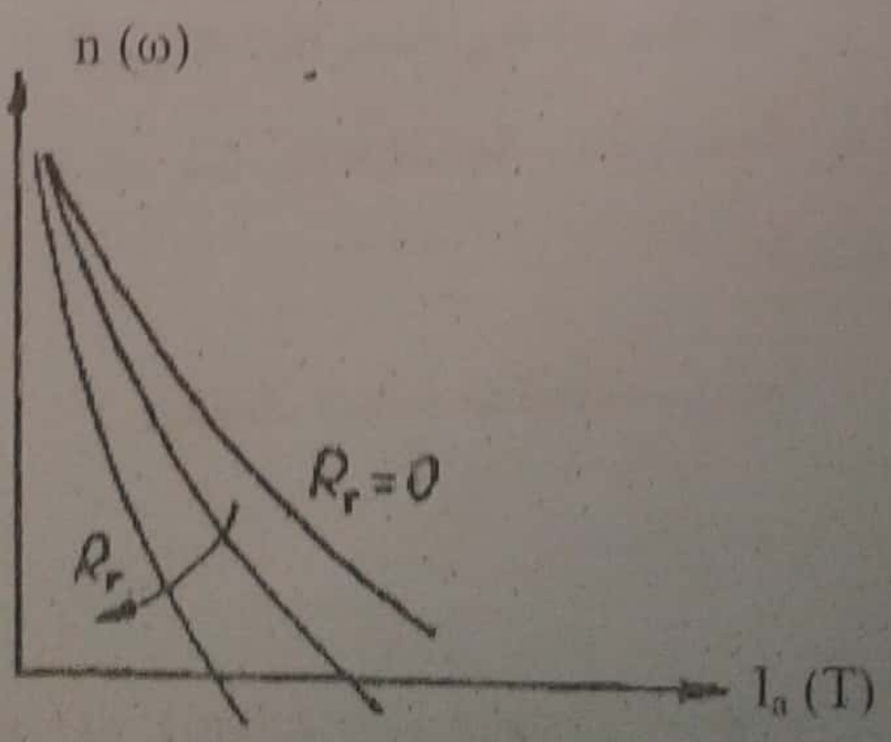
نحصل على المميزات (الكهروميكانيكية و الميكانيكية) الطبيعية عندما $R_r = 0$، أما في حال وجود المقاومة R_r فاننا نحصل على المميزات (الكهروميكانيكية و الميكانيكية) الاصطناعية.

يُمكن كتابة معادلة المميزات الميكانيكية (بدلالة n مثلاً) للمحرك التسلسلي بالشكل التالي:

$$\left.\begin{aligned} n &= \frac{A}{\sqrt{T}} - B \ ; \\ A &= \frac{U}{C_e}\sqrt{\frac{C_m}{\alpha}} \ , \ B = \frac{R_a + R_s + R_r}{C_e.\alpha} \end{aligned}\right\} \qquad (٩-٣٠)$$

يُبين الشكل (٩-٧) الشكل العام للمميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية للمحرك التسلسلي عند قيم مختلفة لـ R_r وهي تشبه القطع الزائد.

تزداد سرعة المحرك مع تناقص قيمة العزم و تصل هذه سرعته إلى اللانهاية عند $T = 0$، لذلك يُحذر من تشغيل المحرك التسلسلي على فراغ (من دون حمل).



الشكل (٩-٧): الشكل العام للمميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية للمحرك التسلسلي عند قيم مختلفة لـ R_r

Scanned by CamScanner

نلاحظ من الشكل (٩-٧) أن المميزات الاصطناعية أقل ليونة من المميزة الطبيعية، وتزداد درجة انحدارها كلما ازدادت قيمة تيار الحمولة وعزمها.

تتم الاستعانة غالباً، من أجل رسم المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية للمحرّك التسلسلي، بالنتائج التجريبية المعطاة في النشرة الفنية Catalog الخاص به و ذلك لأن العلاقة (٩-٣٠) لا تُعطي المميزات الفعلية للمحرّك و إنما مميزات شبيهة بها من حيث الشكل العام وذلك لأنها تعتمد على العلاقة التقريبية (٩-٢٧) و التي تُهمل الإشباع المغناطيسي في المحرّك.

بمقارنة أداء المحرّكات ذات التهييج التسلسلي مع المحرّكات ذات التهييج التفرعي أو المستقل نجد أن العزم $(T = C_m.\Phi.I_a)$ في المحرّكات التفرعية و المستقلة يتناسب مع تيار المتحرّض أي $T \sim I_a$ في حين يتناسب هذا العزم مع مربع تيار المتحرّض في المحرّكات التسلسلية أي $T \sim I_a^2 \Rightarrow I_a \sim \sqrt{T}$. وبما أن تيار الإقلاع المسموح به هو $(2 \div 2,5)I_n$ لذا نستنتج أن المحرّكات التسلسلية تولد عزوم إقلاع كبيرة بالمقارنة مع المحرّكات التفرعية أو ذات التهييج المستقل الأمر الذي جعل لهذه المحرّكات أهمية كبيرة و خاصة و لا سيما في الحالات التي تتطلب عزوم اقلاع قاسية (آلات الجر و الرفع، القاطرات الكهربائية).

تعد السرعة ففي المحرّكات التفرعية و المستقلة التهييج تقريباً ثابتة أي $n \approx const$ أما في المحرّكات التسلسلية فإن السرعة لا تبقى ثابتة بتغير الحمولة المُطبّقة على المحرّك.

تعطى الاستطاعة المفيدة بالعلاقة:

$$P_2 = P_{out} = \omega.T = \frac{2\pi.n}{60}.T \qquad (٩-٣٦)$$

و بما أن $n \approx const$ في المحرّكات التفرعية و المستقلة التهييج فإن $P_2 \sim T$، أما في المحرّكات التسلسلية حيث $I_a \sim \sqrt{T}$ فإن $P_2 \sim \sqrt{T}$ أي أنه عند تغير الحمولة ضمن حدود واسعة يكون تغير كل من الاستطاعة P_1 و P_2 و التيار I_a في المحرّكات التسلسلية أقل حدة منه في المحرّكات التفرعية و المستقلة التهييج و بالتالي فإن

Scanned by CamScanner

المحرّكات التسلسلية تتحمل زيادة التحميل بشكل أفضل و أقل خطورة منها في المحركات التفرعية و المستقلة التهييج.

مثال

يملك محرّك تيار مستمر ذو تهييج تسلسلي المُعطيات الاسمية التالية:

$P_n = 16\ kW,\ \ U_n = 220\,V,\ \ I_n = 86\ A,\ \ n_n = 600\,r.p.m,$

$Ra + R_s = 0{,}297\,\Omega$

كما تعطى النشرة الفنية لهذا المحرك في الجدول الآتي:

$i = \frac{I}{I_n}$	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$\nu = \frac{n}{n_n}$	1,6	1,23	1,09	1,0	0,94	0,89	0,85	0,81

المطلوب:

١- رسم المميزة الكهروميكانيكية الطبيعية.

٢- تعيين قيمة المقاومة R_r الواجب إضافتها إلى دارة المتحرّض لكي تصبح سرعة المحرّك 400 r.p.m و من ثم 200 r.p.m مع المحافظة على القيمة الاسمية للتيار في دارة المتحرّض.

٣- رسم المنحنيات الكهروميكانيكية الاصطناعية الموافقة لقيمتي R_r المحسوبتين في الطلب السابق.

الحل:

١- نقوم بحساب قيم التيار I الحقيقية المقابلة للسرعة n و ذلك انطلاقاً من الجدول المُعطى في النشرة الفنية ومن معرفة المعطيات الاسمية، فنحصل على الجدول الآتي.

Scanned by CamScanner

الفصل العاشر

اقلاع محركات التيار المستمر

Starting of D.C. Motors

١٠-١- مقدمة: Introduction

لا يمكننا عملياً اقلاع محركات التيار المستمر بشكل مباشر Direct Starting عن طريق تطبيق جهد الشبكة U على مرابط هذه المحركات و هي في حالة توقف ($n = 0$)، و تُستثنى من هذه القاعدة محركات التيار المستمر الصغيرة جداً، و التي تتميز بمقاومة متحرّض R_a كبيرة نسبياً، بعطالة صغيرة و عمر فني قصير، و ذلك شريطة أن لا تزيد قيمة تيار الإقلاع في هذه الحالة عن $I_{st} \leq (4 \div 6) I_n$ وأن لا يزيد زمن الإقلاع عن ثانيتين أي $t_{st} \leq 2\ Sec$.

عندما يكون محرّك التيار المستمر في حالة توقف ($n = 0$) تكون القوة المحركة الكهربائية المتولدة في دارة المتحرّض مساوية للصفر ($E_b = 0$) و بالتالي تصبح معادلة الجهد للمحرّك (التفرعي مثلاً) من الشكل:

$$U = E_b + I_a.R_a = I_a.R_a \qquad (١-١٠)$$

و منه يُصبح تيار الإقلاع I_{st}، الذي يساوي تيار المتحرّض من أجل $n = 0$، مساوياً إلى:

Scanned by CamScanner

$$I_{st} = I_a = \frac{U}{R_a} \qquad (٢-١٠)$$

وبما أن مقاومة المتحرّض R_a ذات قيمة صغيرة جداً لذا فإن تيار الإقلاع يساوي في هذه الحالة تيار الدارة القصيرة I_{sc} و الذي يكون كبيراً جداً بالمقارنة مع التيار الاسمي حيث تتراوح قيمته بين عشرين إلى خمسين ضعفاً من التيار الاسمي أي: $I_{st} = I_{sc} = (20 \div 50) I_n$. لا تتلاءم هذه القيمة الكبيرة لتيار الاقلاع مع القيمة الحدية Critical Value للشروط الحرارية لعمل المحرّك التي يجب عدم تجاوزها من أجل ضمان سلامة المحرّك و عدم اتلاف ملفاته. يجب أن لا تزيد القيمة الحدية، التي لا يُسمح للتيار المار في المحرّك بتجاوزها، عن $(2 \div 2,5) I_n$.

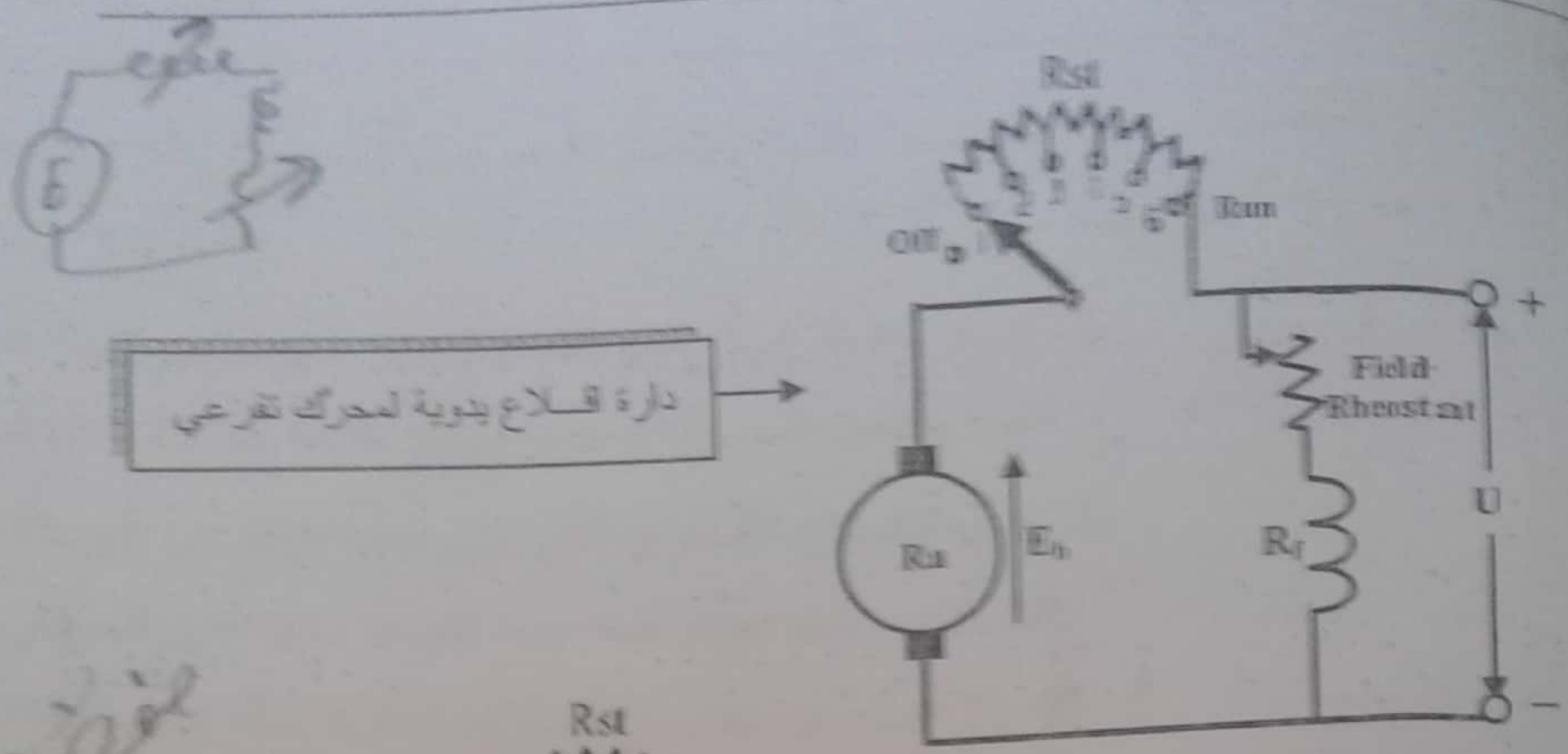
للحد من قيمة تيار المتحرّض عند الإقلاع، يتم اللجوء إلى اضافة مقاومة خارجية متغيرة R_{st} توصل على التسلسل مع ملف المتحرّض و تسمى بمقاومة الإقلاع Starting Rheostat. يتم تصميم هذه المقاومة بحيث تتألف من عدة أجزاء (مراحل أو درجات) موصولة على التسلسل مع بعضها البعض و يتم اخراجها تدريجياً أثناء عملية الاقلاع و ذلك تبعاً لزيادة سرعة المحرّك حيث يتسبب بقاؤها في دارة المتحرّض بزيادة الضياعات وبهبوط كبير لمميزة (العزم – السرعة) مع زيادة الحمل.

تُصنع مقاومة الإقلاع المتغيرة (الريوستات) من أسلاك معدنية وتستهلك قدرة كهربائية نتيجة مرور التيار فيها، لذا فهي تحتاج إلى عملية تبريد ويتم ذلك باستخدام الهواء أو الزيت.

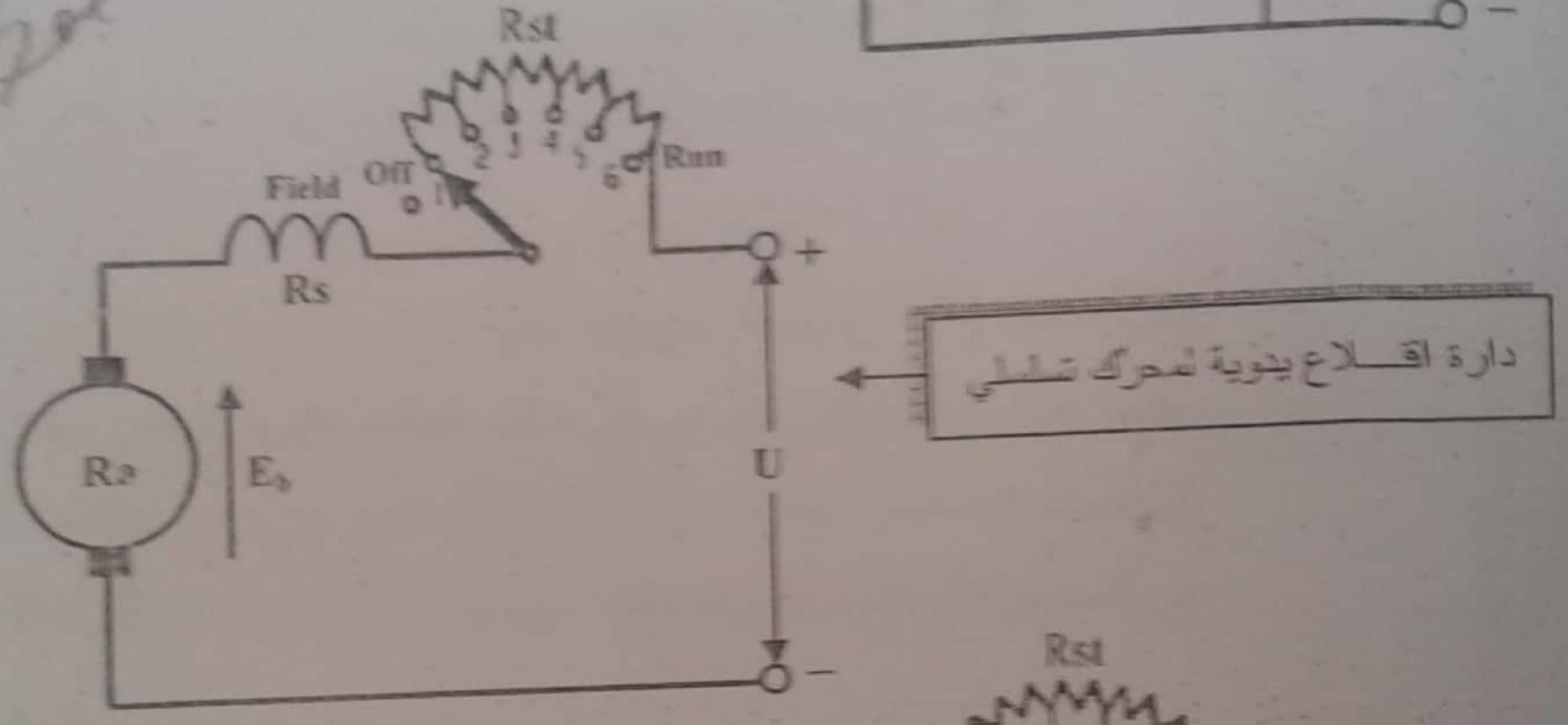
يُمكن حساب قيمة R_{st} و عدد مراحلها بشكل تحليلي أو بياني بحيث يحقق المحرّك الشروط الحرارية المطلوبة لعمله.

يبين الشكل (١٠-١) دارة إقلاع يدوية لمحرّكات التيار المستمر التفرعية والتسلسلية والمختلطة حيث يتم ادخال كامل مقاومة الاقلاع في البداية و من ثم يتم اخراجها تدريجياً أثناء عملية الاقلاع و ذلك تبعاً لزيادة سرعة المحرّك.

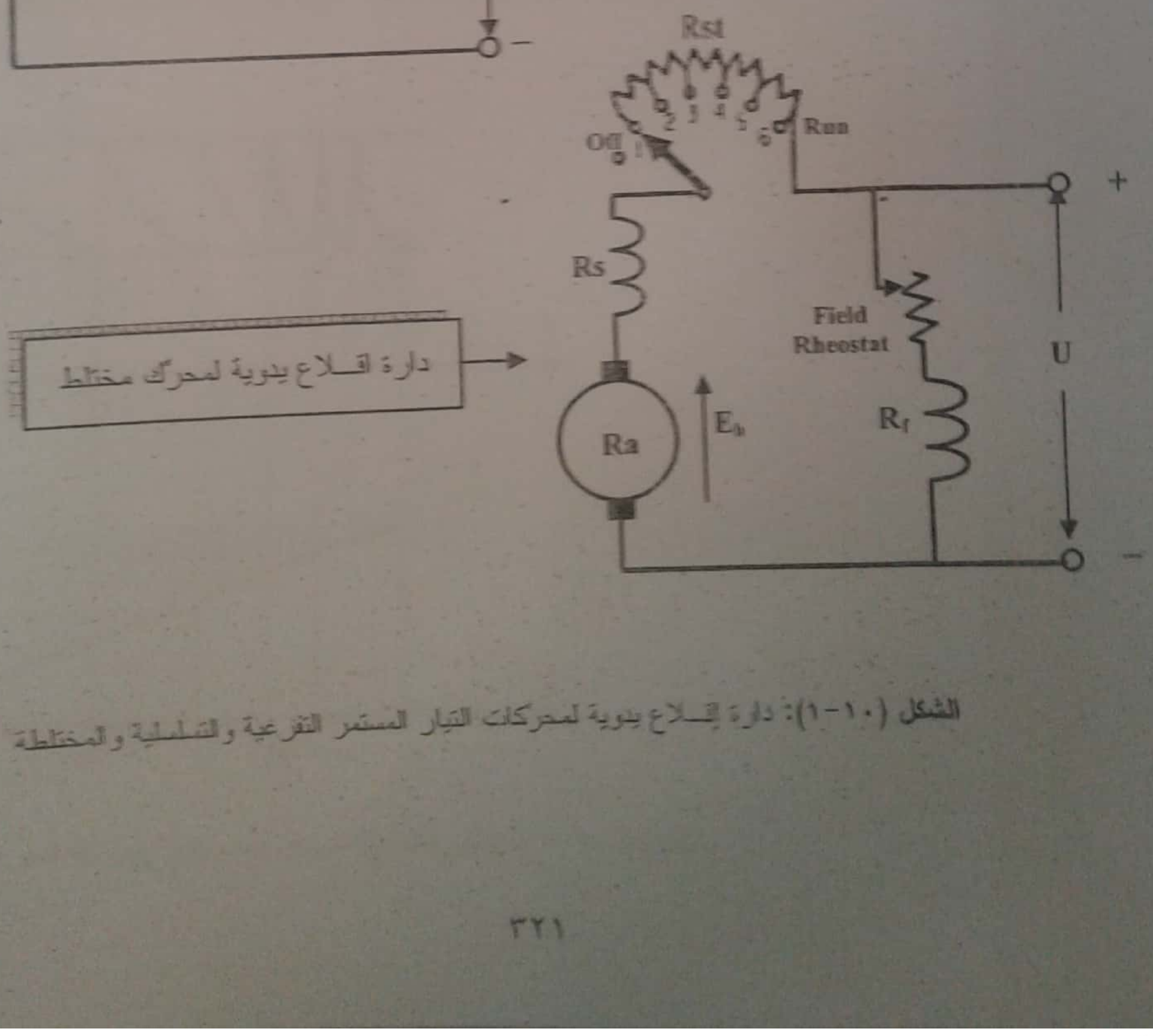
Scanned by CamScanner



دارة اقلاع يدوية لمحرك تفرعي



دارة اقلاع يدوية لمحرك تسلسلي



دارة اقلاع يدوية لمحرك مختلط

الشكل (١٠-١): دارة إقلاع يدوية لمحركات التيار المستمر التفرعية والتسلسلية والمختلطة

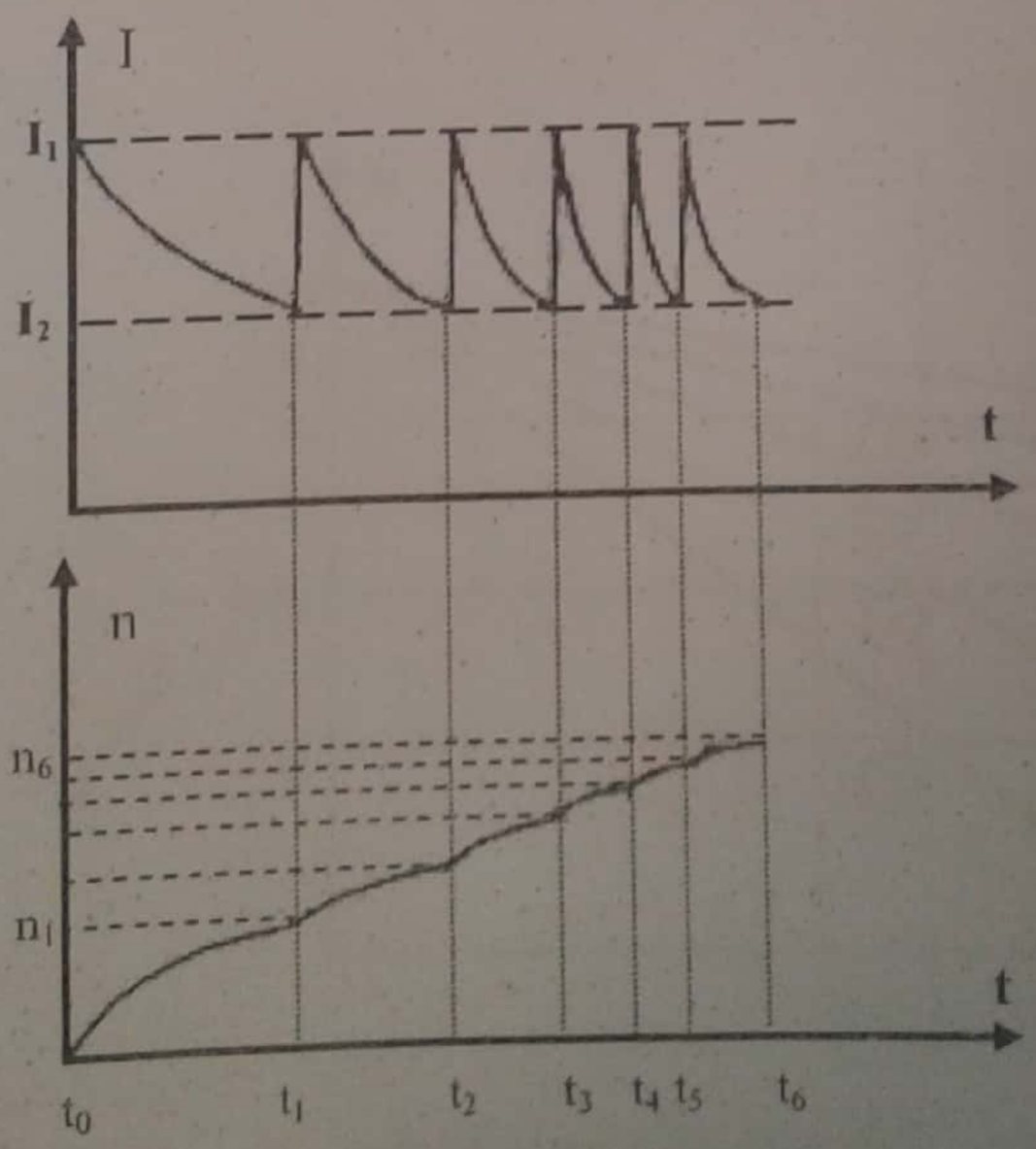
Scanned by CamScanner

يتأرجح تيار الاقلاع (تيار المتحرّض) أثناء عملية الاقلاع بين قيمتين حديتين للتيار هما:

I_1 : تيار الاقلاع الأعظمي المسموح به و الذي يراعي القيمة الحدية للشروط الحرارية لعمل المحرّك و هو يساوي عادة $I_1 = (2 \div 2,5)\, I_n$.

I_2: تيار الاقلاع الأصغري الذي يتم عنده الانتقال إلى المرحلة التالية من مراحل الاقلاع و يتم اختيار قيمة هذا التيار بحيث تكون قيمة عزم المحرّك المقابل له T_2 أكبر من مجموع العزوم المقاومة للآلة بمقدار $\%(25 \div 10)$. تقع قيمة هذا التيار ضمن المجال: $I_1 \rangle I_2 \rangle I_n$ و هي تساوي عملياً $I_2 = (1,1 \div 1,25)\, I_n$.

يبين الشكل (١٠-٢) وصفاً تخطيطياً لتغيّر كل من تيار المتحرّض والسرعة الدورانية عندما يتسارع المحرّك، التفرعي في هذه الحالة، على مراحل ليصل إلى سرعته النظامية. إن هذه المنحنيات معطية من أجل محرّك تفرعي و هي مشابهة بشكل عام لمثيلاتها في المحرّكات التسلسلية والمختلطة مع وجود اختلاف بسيط في شكل الانحناء.



الشكل (١٠-٢): تغيّر كل من تيار المتحرّض والسرعة الدورانية أثناء عملية الاقلاع

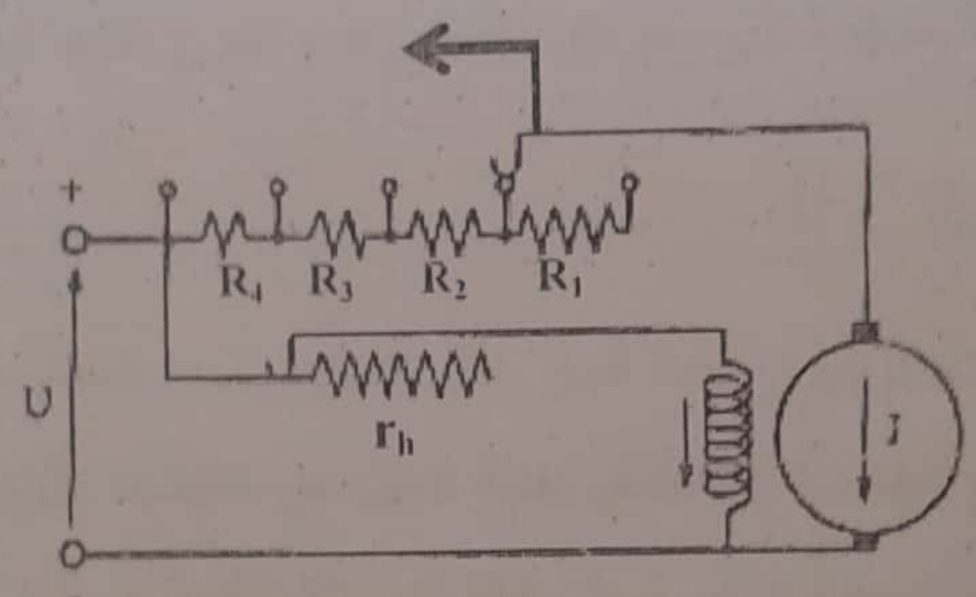
Scanned by CamScanner

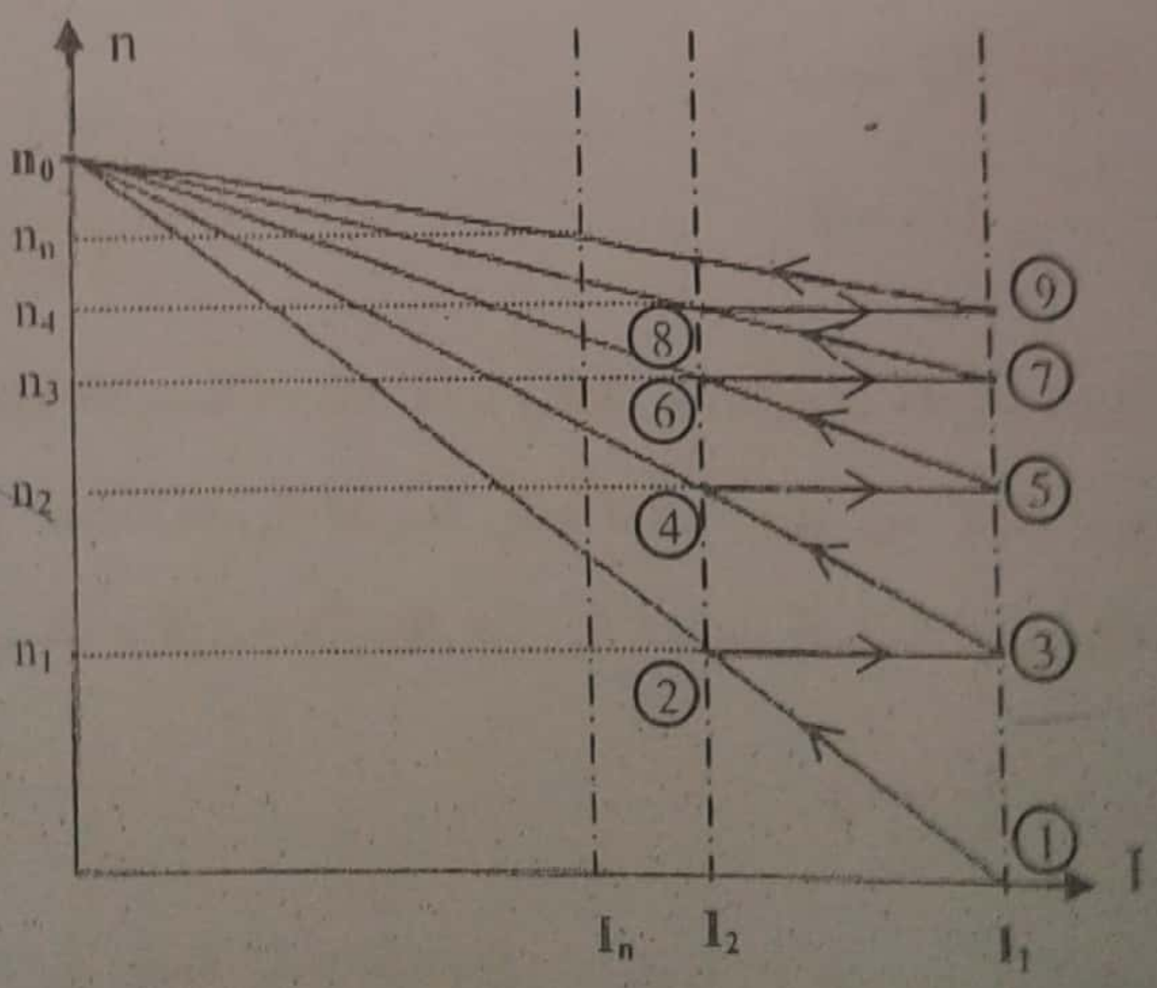
١٠-٢ – آلية اقلاع محرّكات التيار المستمر التفرعية و المستقلة:

Starting Mechanism of Shunt and Separately Excited D.C. Motors

يوضح الشكل (١٠-٣) المخطط البياني للمميزة الكهروميكانيكية لمحرّك تفرعي أثناء إقلاعه على أربع مراحل أي أن مقاومة الاقلاع تساوي في هذه الحالة: $R_{st} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$. يتم اختيار مقاومة الإقلاع و عدد درجاتها بحيث يتم هذا الإقلاع، كما أشرنا سابقاً، بين القيمتين الحديتين للتيار I_1 و I_2.

من أجل الحصول على عزم اقلاع جيد يتم الاقلاع بفيض أعظمي و ذلك بإعطاء المقاومة المتغيرة r_h الموصولة على التسلسل مع ملف التهييج قيمة الصفر.





الشكل (١٠-٣): مراحل اقلاع المحرّك التفرعي

Scanned by CamScanner

يبدأ الاقلاع بتطبيق كامل جهد الشبكة U على مرابط المحرّك بوجود مقاومة الإقلاع الكلية $R_{st} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ فيبدأ عندها المحرّك بالاقلاع على المميزة الاصطناعية الموافقة لهذه المقاومة من النقطة (1) ذات السرعة $n = 0$ والتيار $I = I_1$ و تكون $E_b = 0$. يساوي تيار الاقلاع في هذه الحالة :

$$I_{st} = I_1 = \frac{U}{R_a + R_{st}} = \frac{U}{R_a + R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \qquad (٣-١٠)$$

تبدأ سرعة المحرك بالتزايد مما يؤدي إلى ظهور E_b و تزايدها و بالتالي تناقص قيمة التيار. عندما تصل السرعة إلى القيمة n_1 (النقطة 2) تكون القوة المحرّكة الكهربائية العكسية مساوية إلى $E_{b1} = C_e.\Phi.n_1$ و تكون عندها قيمة التيار مساوية إلى:

$$I = I_2 = \frac{U - E_{b1}}{R_a + R_{st}} \qquad (٤-١٠)$$

و بما أنه لا يجوز لقيمة التيار I أن تنخفض تحت القيمة I_2 حتى لا يفشل الإقلاع، نقوم بإخراج المقاومة R_1 فتنتقل نقطة العمل من النقطة (2) إلى النقطة (3) على المميزة الكهروميكانيكية التالية، الموافقة للمرحلة الثانية من الإقلاع، و بالتالي تقفز قيمة التيار من I_2 إلى I_1 في حين تبقى سرعة الدوران دون تغيير و مساوية n_1. تكون قيمة التيار عند النقطة (3) مساوية إلى:

$$I = I_1 = \frac{U - E_{b1}}{R_a + R_2 + R_3 + R_4} \qquad (٥-١٠)$$

تزداد سرعة المحرك، و بالتالي تزداد القوة المحرّكة الكهربائية العكسية، من جديد فتتناقص قيمة التيار من جديد. عندما تصل السرعة إلى القيمة n_2 (النقطة 4) تكون القوة المحرّكة الكهربائية العكسية مساوية إلى $E_{b2} = C_e.\Phi.n_2$ و تكون عندها قيمة التيار مساوية إلى:

$$I = I_2 = \frac{U - E_{b2}}{R_a + R_2 + R_3 + R_4} \qquad (٦-١٠)$$

عندئذ نقوم بإخراج المقاومة R_2 فتنتقل نقطة العمل من النقطة (4) إلى النقطة (5) على المميزة الكهروميكانيكية التالية، الموافقة للمرحلة الثالثة من الإقلاع، و بالتالي تقفز قيمة

Scanned by CamScanner

التيار من I_2 إلى I_1 في حين تبقى سرعة الدوران دون تغيير و مساوية n_2. تكون قيمة التيار عند النقطة (5) مساوية إلى:

$$I = I_1 = \frac{U - E_{b2}}{R_a + R_3 + R_4} \qquad (7-10)$$

تعود سرعة المحرك ، و بالتالي القوة المحركة الكهربائية العكسية، للتزايد من جديد فتتناقص قيمة التيار من جديد، عندما تصل السرعة إلى القيمة n_3 (النقطة 6) تكون $E_{b3} = C_e . \Phi . n_3$ و تكون عندها قيمة التيار مساوية إلى:

$$I = I_2 = \frac{U - E_{b3}}{R_a + R_3 + R_4} \qquad (8-10)$$

نقوم بإخراج المقاومة R_3 فتنتقل نقطة العمل من النقطة (6) إلى النقطة (7) على المميزة الكهروميكانيكية التالية، الموافقة للمرحلة الرابعة من الإقلاع، و بالتالي تقفز قيمة التيار من I_2 إلى I_1 في حين تبقى سرعة الدوران دون تغيير و مساوية n_3. تكون قيمة التيار عند النقطة (7) مساوية إلى:

$$I = I_1 = \frac{U - E_{b3}}{R_a + R_4} \qquad (9-10)$$

و هكذا تزداد سرعة المحرك حتى تصل إلى القيمة n_4 (النقطة 8) حيث تصبح $E_{b4} = C_e . \Phi . n_4$ و تكون عندها قيمة التيار مساوية إلى:

$$\dot{I} = I_2 = \frac{U - E_{b4}}{R_a + R_4} \qquad (10-\dot{10})$$

عندئذ نُخرج المقاومة R_4، وبالتالي نكون قد أخرجنا مقاومة الإقلاع بشكل كامل، فتنتقل نقطة العمل من النقطة (8) إلى النقطة (9) على المميزة الميكانيكية الطبيعية للمحرك فتصبح قيمة التيار عندها مساوية إلى:

$$I = I_1 = \frac{U - E_{b4}}{R_a} \qquad (10-11)$$

معادلة تقريبية سابقة

Scanned by CamScanner

و بالتالي ينتقل المحرّك للعمل على المميزة الكهروميكانيكية الطبيعية و تزداد سـرعته حتـى تستقر عند القيمة الموافقـة لتيـار حمولتة الحالية و التي تساوي في الحالة المبينة في الشكل (١٠-٣) إلى التيار الاسمي I_n.

<u>ملاحظـــة:</u> يُمكن أن تتـم عملية إخـراج أجزاء (أو مراحـل) مقاومـة الاقـلاع مـن دارة المتحرّض إما بطريقـة يدوية أو بطريقـة آليـة.

١٠-٢-١- حساب مقـاومـة الإقـلاع و درجاتهـا تحليليـاً:

عند بدء الاقـلاع يكـون لدينا:

$$\left.\begin{aligned} & I = I_1 \;,\; E_b = 0 \\ & \Rightarrow U = 0 + I_1(R_a + R_{st}) \\ & \Rightarrow R_{st} = \frac{U}{I_1} - R_a \end{aligned}\right\} \qquad (١٠-١٢)$$

نفترض دوماً ثبات السرعة عند الانتقال من مميـزة إلى أخرى (من النقطـة 2 إلـى النقطة 3 مثلاً) و نتيجة لذلك تبقى القـوة المحرّكة الكهربائية العكسية واحـدة دون تغيـر لحظة الانتقـال. بما أن السرعة عند النقطتين (2) و (3) هي نفسها، يمكننا أن نكتب:

$$\left.\begin{aligned} & E_{b2} = E_{b3} \\ & \Rightarrow U - I_2(R_a + R_{st}) = U - I_1(R_a + R_{st} - R_1) \\ & \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_a + R_{st} - R_1}{R_a + R_{st}} \\ & \Rightarrow R_1 = (R_a + R_{st}).(1 - \frac{I_2}{I_1}) \end{aligned}\right\} \qquad (١٠-١٣)$$

عند إخراج المقاومة R_2 تنتقل نقطة العمل من المميزة الثانية إلى المميزة الثالثة (من النقطة 4 إلى النقطة 5) فيكون لدينا:

Scanned by CamScanner

$$E_{b4} = E_{b5}$$
$$\Rightarrow U - I_2(R_a + R_{st} - R_1) = U - I_1(R_a + R_{st} - R_1 - R_2)$$
$$\Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_a + R_{st} - R_1 - R_2}{R_a + R_{st} - R_1}$$
$$\Rightarrow R_2 = (R_a + R_{st} - R_1)(1 - \frac{I_2}{I_1}) \qquad (١٤-١٠)$$

و هكذا نكرر هذه العملية (m) مرة حتى نحصل على المقاومة الأخيرة من مقاومات الاقلاع، علماً أن (m) هي عدد درجات الاقلاع و التي تساوي (4) في المثال المبين في الشكل (١٠-٣)، أي:

$$U - I_2(R_a + R_{st} - R_1 - R_2 - \dots - R_{m-1}) = U - I_1(R_a)$$
$$\Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_a}{R_a + R_{st} - R_1 - R_2 - \dots - R_{m-1}} \qquad (١٥-١٠)$$
$$\text{OR} \qquad R_m = R_{st} - R_1 - R_2 - \dots - R_{m-1}$$

بضرب العلاقات السابقة التي عددها (m) طرفاً بطرف نجد:

$$\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^m = \frac{R_a}{R_a + R_{st}} \qquad (١٦-١٠)$$

$$\Rightarrow I_2 = I_1 \sqrt[m]{\frac{R_a}{R_a + R_{st}}} \qquad (١٧-١٠)$$

لإيجاد حساب مقاومة الاقلاع و درجاتها تحليلياً نقوم بالخطوات التالية:

١- اختيار قيمة I_1 بحيث تقع في المجال $I_1 = (2 \div 2.5) I_a$

٢- حساب مقاومة الاقلاع من العلاقة $R_{st} = \frac{U}{I_1} - R_a$

٣- اختيار عدد درجات الاقلاع (m) و من ثم حساب قيمة I_2 من العلاقة (١٠-١٧) و التي تكون مقبولة اذا وقعت ضمن المجال المحدد لها أي : $I_n < I_2 < I_1$ و إلا يجب اختيار عدد درجات جديد و هكذا.

٤- كما يُمكن حساب عدد درجات الاقلاع (m) من خلال اعتماد قيمتين متناسبتين لكل من I_1 و I_2 حسب الشروط المشار إليها سابقاً و انطلاقاً من العلاقة (١٠-١٦) و ذلك بأخذ لوغاريتم الطرفين، أي:

$$m = \frac{Ln\left(\frac{R_a + R_{st}}{R_a}\right)}{Ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)} \qquad (١٠-١٨)$$

١٠-٢-٢- حساب مقاومة الاقلاع و درجاتها بيانياً:

يمكن حساب مقاومة الإقلاع و درجاتها بيانياً، لمحرك تيار مستمر تغذية مستقل، باتباع الخطوات التالية:

١- نقوم، انطلاقاً من معطيات المحرك الاسمية، برسم منحني المميزة الطبيعية $n = f(I)$ و ذلك بمعرفة النقطتين (I_n, n_n) و $(0, n_0)$.

٢- نختار قيمتي التيار الصغرى I_2 والعظمى I_1 حسب الشرطين السابقين بحيث يتأرجح تيار الإقلاع بينهما .

٣- نرسم المميزة الاصطناعية المقابلة لحالة إدخال كامل المقاومة $(R_{st} + R_a)$ والذي يمر من النقطتين $(n_0, 0)$ و (A) ذات الاحداثيات $(I_1, 0)$ ، كما هو مبين في الشكل (١٠-٤).

Scanned by CamScanner

الفصل الحادي عشر

الفرملة الكهربائية لمحركات التيار المستمر

The Electrical Braking of D.C. Motors

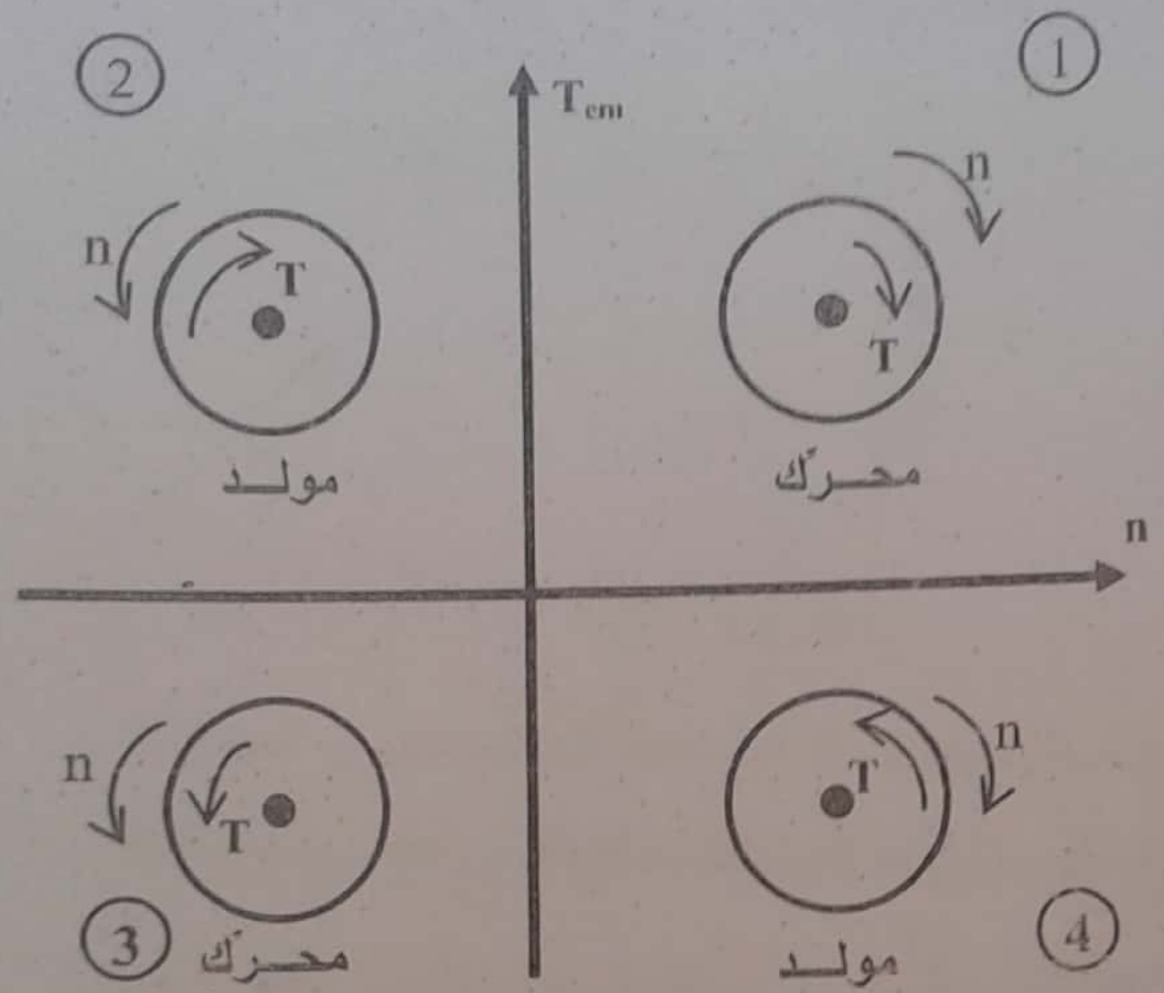
١١-١ - مقدمة: Introduction

تكتسب الفرملة ميكانيكية هامة في عملية تشغيل الآلات الكهربائية و التحكم بها لا تقل أهمية عن عملية الانطلاق حيث تساهم في زيادة الانتاجية و الدقة في العمل و لا سيما في الآلات ذات الانطلاق و التوقف المتكررين مثل آلات قطع المعادن، آلات الدرفلة، الجرافات ووسائط الجر الكهربائي، كما أنها تكون حيوية عند الحاجة لإيقاف المحرك بسرعة و خلال زمن قصير أو الحد من سرعته عند ظهور عزم دوراني إضافي على محوره (سير قاطرة كهربائية على منحدر).

تظهر، خلال عملية استثمار محركات التيار المستمر، الحاجة إلى إجراء الكبح أو الفرملة لهذه المحركات و ذلك عند الضرورة للتوقف السريع أو خفض سرعة دوران آليات التشغيل المقادة بواسطة هذه المحركات. تتم عملية الفرملة إما باستخدام كوابح ميكانيكية و التي تعاني بشكل عام من بطء في التجاوب و صعوبة في الأتمتة، أو باستخدام الفرملة الكهربائية التي تعتمد على استثمار عزم المحرك نفسه في الفرملة حيث يعمل المحرك في حالة الفرملة في الربعين الثاني و الرابع من محاور الإحداثيات (n, T) حيث تكون

Scanned by CamScanner

الاستطاعة سالبة و يعمل المحرك خلالها كمولـد يحول الطاقـة الكهربائيـة المتولـدة فيـه إلى طاقة حرارية أو يعيدها إلى الشبكة، الشكل (١١-١) .



الشكل (١١-١): شروط عمل آلة التيار المستمر كمحرّك و كمولد

يوجد ثلاث طرق للفرملة الكهربائية لمحركات التيار المستمر وهي:

١- الفرملـــة مع إعادة القدرة إلى الشبكة Regenerative Braking

٢- الفرملـــة الديناميكية Dynamic Braking

٣- الفرملـــة بالتوصيل على التضاد (الكهرومغناطيسية)

Plugging Counter-Current Braking

١١-٢- فرملـــة محـــرّكات التيـــار المستمر التفرعيـــة و المستقلة:

Braking of Shunt and Separately Excited D.C. Motors

يمكن فرملة المحركات التفرعية و المستقلة التهييج كهربائياً باستخدام الطرق الثلاثـــة الآنفة الذكر و التي سنقوم بدراستها كل على حدا.

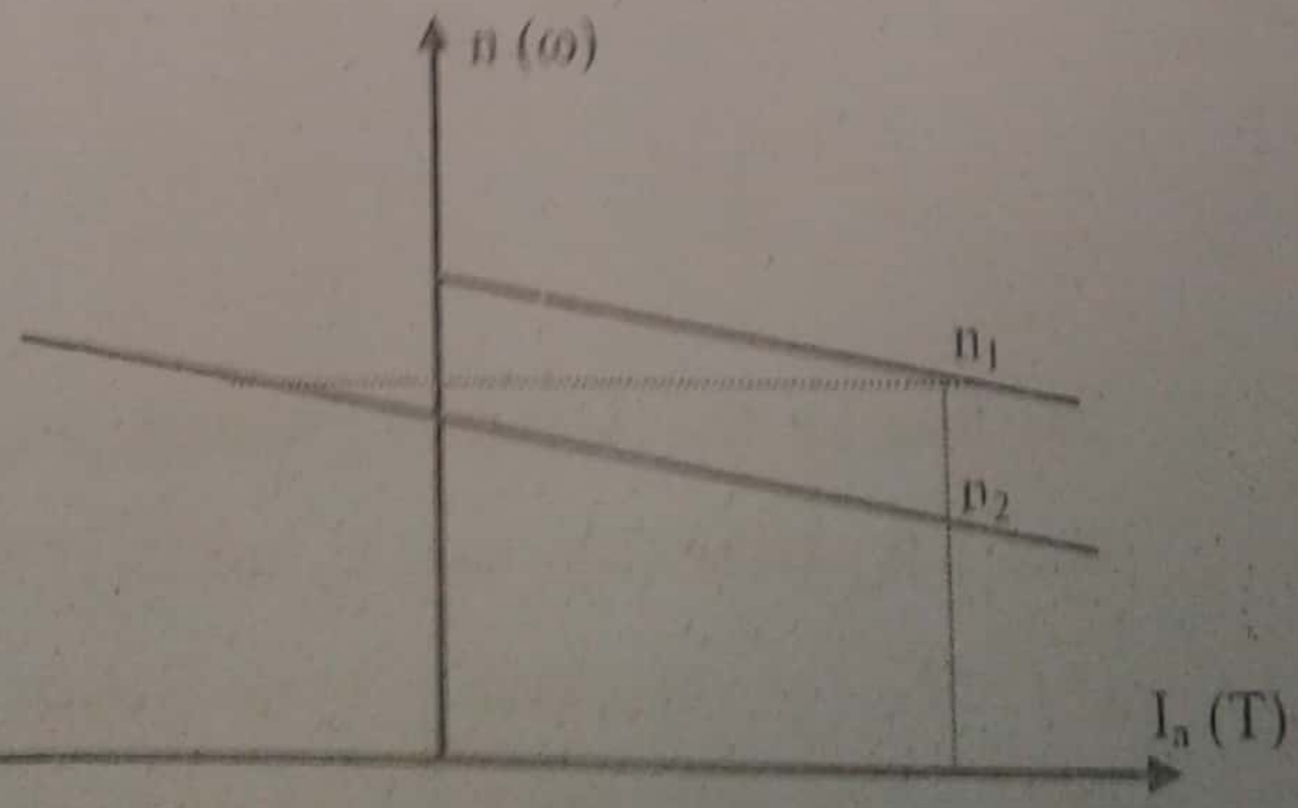
Scanned by CamScanner

١١-٢-١- الفرملة مع إعادة القدرة إلى الشبكة: Regenerative Braking

يحصل هذا النوع من الفرملة عندما تزداد سرعة المحرك لسبب ما (نقل هابط ذي رافعة، تخفيض سرعة المحرك الذي يقود آلة ما تدور بسرعة معينة إلى سرعة أخفض، ...) بحيث تُصبح أعلى من سرعته على فراغ أي:

$$\left.\begin{array}{l} n > n_0; \qquad n_0 = \dfrac{U}{C_e . \Phi} \\ \\ \text{OR} \\ \\ \omega > \omega_0; \qquad \omega_0 = \dfrac{U}{C_m . \Phi} \end{array}\right\} \qquad (١١-١)$$

فتزداد في هذه الحالة القوة المحركة الكهربائية العكسية المتولدة في المحرك $E_b = C_e . \Phi . n = C_m . \Phi . \omega$ لتصبح أكبر من جهد الشبكة U المُطبّق على مرابط المحرك و يغير التيار حسب المعادلة $I_a = \dfrac{U - E_b}{R_a}$ (0 اتجاهه فيتحول بالتالي المحرك إلى مولد تيار مستمر مربوط على التفرع مع شبكة التغذية الكهربائية يقوم بإعطائها القدرة الكهربائية. يبين الشكل (١١-٢) انتقال نقطة عمل المحرك، لحظة خفض السرعة، على امتداد المميزة ذات السرعة الأخفض في الربع الثاني.



الشكل (١١-٢): الفرملة مع إعادة القدرة إلى الشبكة عن طريق تخفيض سرعة المحرك

Scanned by CamScanner

يؤدي انعكاس جهة التيار إلى نشوء عزم مقاوم T_a < 0 يفرمل حركة المحرك و تصبح العلاقة العامة للميزات الكهروميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل و التفرعي من الشكل:

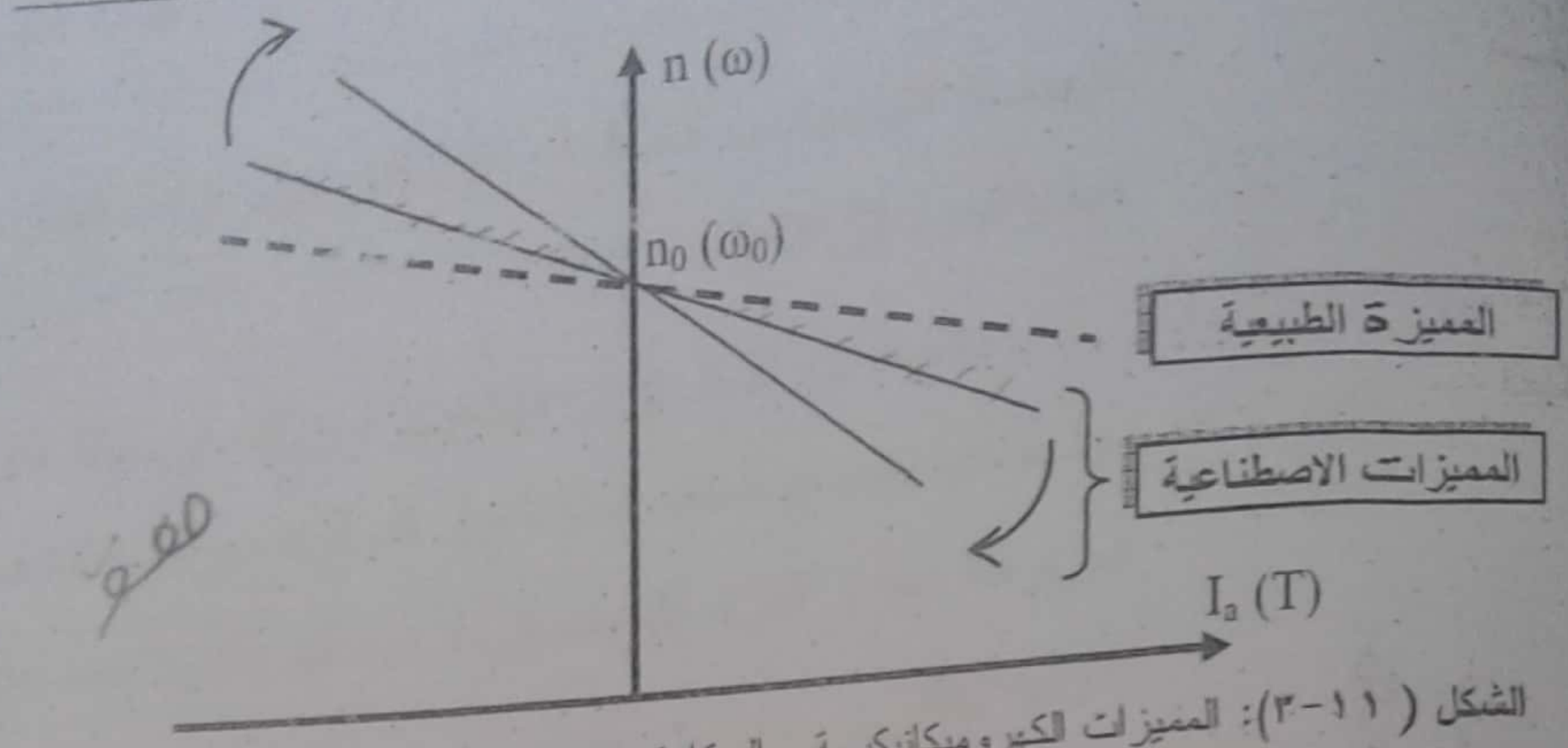
$$\left.\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e.\Phi} \pm \frac{I_a(R_a+R_r)}{C_e.\Phi} \\ \text{OR} & \\ \omega &= \frac{U}{C_m.\Phi} + \frac{I_a(R_a+R_r)}{C_m.\Phi} \end{aligned}\right\} \qquad (11-2)$$

كما تصبح العلاقة العامة للميزات الميكانيكية لهذه المحركات من الشكل:

$$\left.\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e.\Phi} + \frac{T_a(R_a+R_r)}{C_m.C_e.\Phi^2} \\ \text{OR} & \\ \omega &= \frac{U}{C_m.\Phi} + \frac{T_a(R_a+R_r)}{C_m^{\,2}.\Phi^2} \end{aligned}\right\} \qquad (11-3)$$

تأخذ المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية لهذه المحركات في حالة الفرملة مع إعادة القدرة إلى الشبكة الشكل المبين في الشكل (11-3). نلاحظ، انطلاقاً من العلاقات (11-2) و (11-3) و الشكل (11-3)، أن هذه المميزات ما هي إلا امتداد لمميزات المحرك، في حالة التشغيل الطبيعية، في الربع الثاني من المستوي (n, I) أو المستوي (n, T).

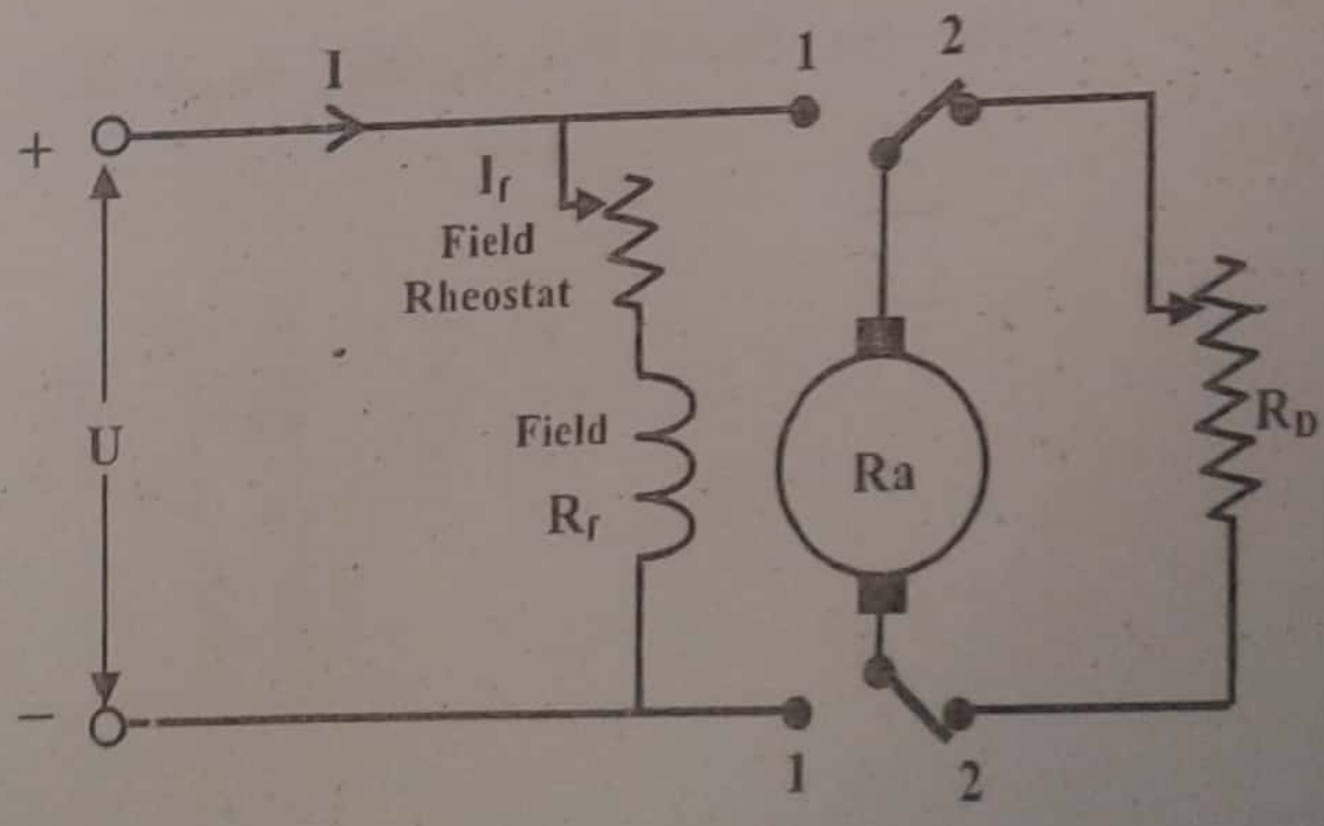
Scanned by CamScanner



الشكل (١١-٣): المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل و التفرعي في حالة الفرملة مع إعادة القدرة إلى الشبكة

١١-٢-٢- الفرملة الديناميكية: Dynamic Braking

تتم فرملة هذه المحركات ديناميكياً بفصل دارة المتحرض عن شبكة التغذية ووصلها مباشرة مع مقاومة أومية خارجية R_D مع المحافظة على دارة التهييج موصولة إلى شبكة التغذية لنؤمن فيضاً مغناطيسياً يحرض بدوره قوة محركة كهربائية في المتحرض كافية لتوليد عزم مضاد، الشكل (١١-٤).



الشكل (١١-٤): دارة الفرملة الديناميكية لمحرك تفرعي

يستخدم عادة هذا النوع من الفرملة في الحالات الطارئة التي يراد بها إيقاف الآلة بشكل كلي و سريع و دقيق (حالة حادث طارئ في الآلة أو مع أحد العاملين عليها). تعد

Scanned by CamScanner

الفرملـــة الديناميكيـــة اقتصادية و لكن اقتصاديتها ليست أفضل من اقتصادية الفرملـــة مـــع اعادة القدرة إلى الشبكة.

نلاحظ من الشكل (١١-٤) تحول المحرك، في حالة الفرملـــة الديناميكيـــة، إلـــى مولـــد ذي تهييـــج مستقل حيث تتحول القـــدرة الحركيـــة للمحـــرك و الآلـــة الميكانيكيـــة المربوطة معه و المراد ايقافهـــا إلى قـــدرة كهربائيـــة تتبدد على شكل حـــرارة في المقاومة الأومية R_D.

بما أن المتحرّض مفصول عن الشبكة (U=0) فإن التيار الذي يستهلكه المحـــرك من الشبكة يساوي الصفر، لكن المتحرّض يظل دائـــراً في اتجاهه تحت تأثير عـــزم العطالـــة و تتولد فيه قـــوة محرّكة كهربائيـــة $E_b = C_e.\Phi.n = C_m.\Phi.\omega$ و يكـــون عندئـــذ تيـــار المتحرّض مسوياً لتيار الفرملـــة الديناميكيـــة أي:

$$I_a = I_D = \frac{0-E}{R_a+R_D} = -\frac{E}{R_a+R_D} \qquad (١١-٤)$$

يؤدي تغيير اتجـــاه التيار إلى تغيير اتجـــاه العـــزم الذي يصبح عزماً مفرملاً مساوياً إلى:

$$\left.\begin{aligned} T_a &= C_m.\Phi.I_a = C_m.\Phi.\left[\frac{-E}{R_a+R_D}\right] \Rightarrow \\ T_a &= -C_e.C_m.\frac{n.\Phi^2}{R_a+R_D} \end{aligned}\right\} \qquad (١١-٥)$$

أي أنه عند ثبات الفيض المغناطيسي فإن عزم الفرملـــة أو الكبـــح يتعلق بمقاومة الفرملة R_D و بسرعة الدوران التي تنخفض بسبب الفرملة.

تصبح العلاقـــة العامـــة للمميزات الكهروميكانيكية لمحرّكات التيـــار المـــستمر ذات التهييـــج المستقل و التفرعي في حالة الفرملـــة الديناميكيـــة من الشكل:

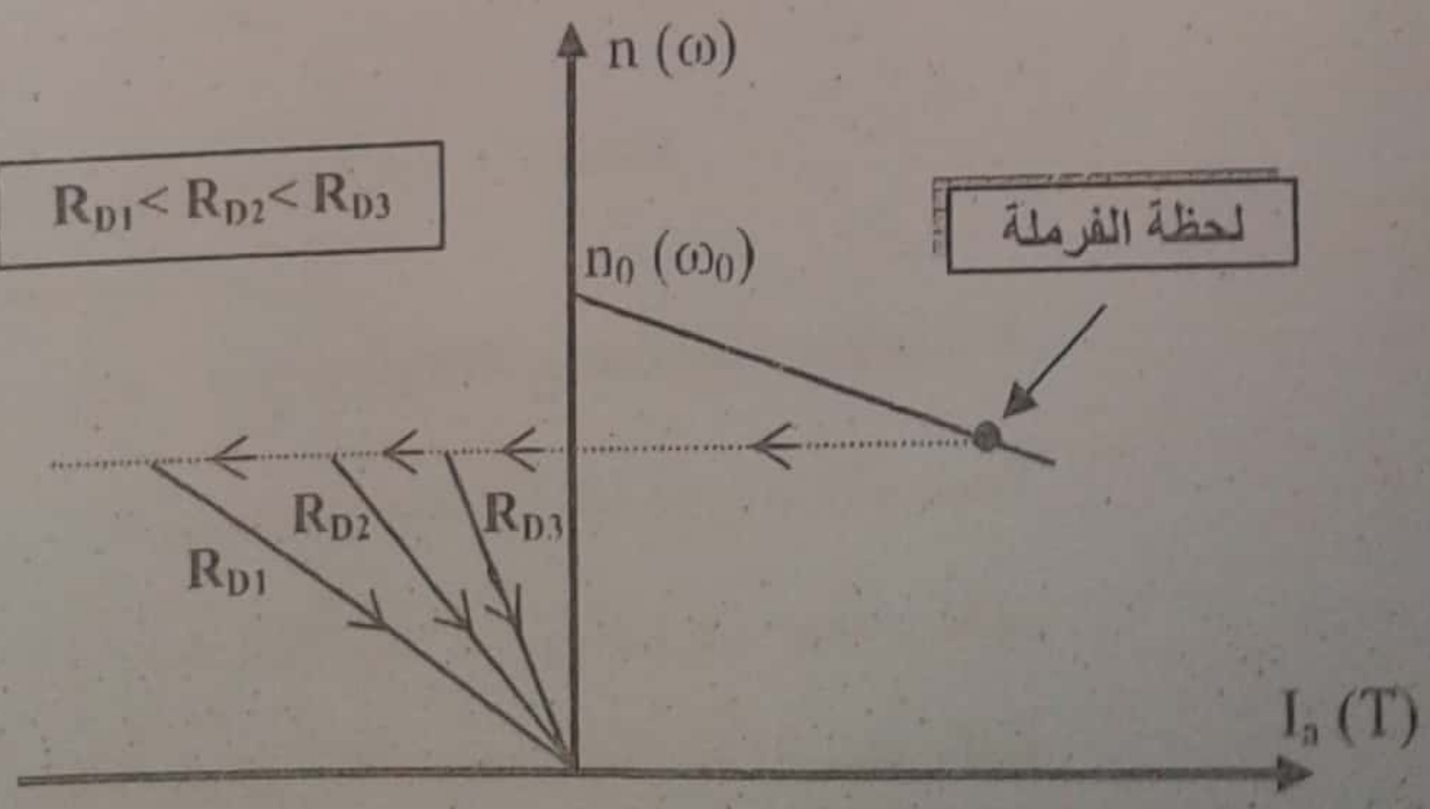
Scanned by CamScanner

$$\left.\begin{aligned} n &= -\frac{I_a (R_a + R_D)}{C_e . \Phi} \\ \text{OR} \\ \omega &= -\frac{I_a (R_a + R_D)}{C_m . \Phi} \end{aligned}\right\} \qquad (٦-١١)$$

كما تصبح العلاقة العامة للمميزات الميكانيكية لهذه المحركات من الشكل:

$$\left.\begin{aligned} n &= -\frac{T_a (R_a + R_D)}{C_m . C_e . \Phi^2} \\ \text{OR} \\ \omega &= -\frac{T_a (R_a + R_D)}{C_m^{\,2} . \Phi^2} \end{aligned}\right\} \qquad (٧-١١)$$

تمثل هذه المعادلات مجموعة مستقيمات مارة من المبدأ و تقع في الربع الثاني من المستوي (n, I) أو المستوي (n, T) كما هو موضّح في الشكل (١١-٥).



الشكل (١١-٥): المميزات الكمرومكانيكية و الميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل و التفرعي في حالة الفرملة الديناميكية

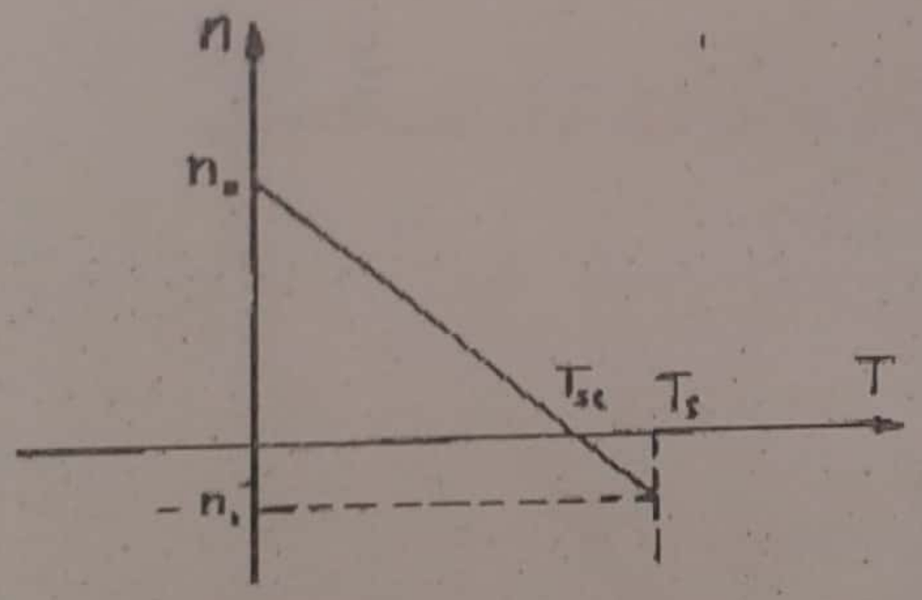
Scanned by CamScanner

١١-٢-٣- الفرملة بالتوصيل على التضاد (الكهرومغناطيسية):

Plugging Counter-Current Braking

يمكن تحقيق حالة الفرملة على التضاد في حالتين هما:

١- **دوران المحرّك بعكس اتجاه عزمه الدوراني:** عندما يدور المحرّك بسرعة تعاكس اتجاه عزمه الدوراني، وذلك تحت تأثير عزم الحمولة أو بسبب القدرة الحركية الكامنة فيه ويتحقق ذلك عندما يصبح عزم دارة القصر (T_{sc}) فيه أثناء عمله على مميزاته في الربع الأول أقل من عزم الحمولة المطبقة (T_s) على محوره. ويمكن تنفيذ هذه الحالة عملياً عندما يعمل المحرّك على مميزاته الاصطناعية التي تصبح ليّنة وذلك من أجل انزال حمولات كبيرة بسرعات منخفضة، حيث تستقر سرعة المحرّك على امتداد هذه المميزات في الربع الرابع ، كما هو في الشكل (١١-٦). ففي هذه الحالة يسعى المحرّك لرفع الحمل المطبق على محوره بينما ينزل الحمل تحت تأثير عزم الحمولة (ثقله) بسرعة معاكسة لسرعة الدوران التي يسعى المحرّك لتوليدها.

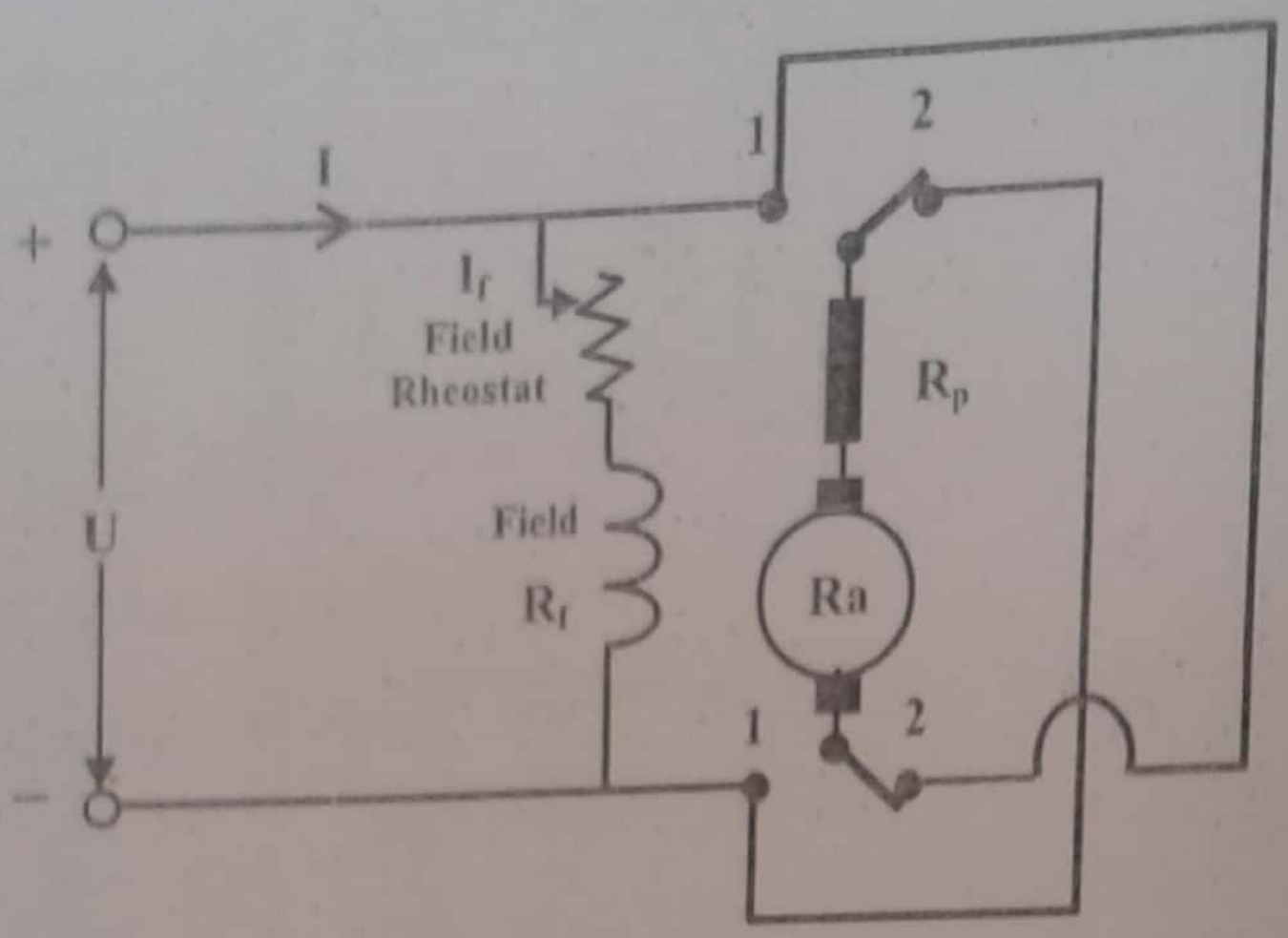


الشكل (١١-٦): المميزة الميكانيكية لفرملة المحرّك على التضاد في حالة دورانه بعكس اتجاه عزمه الدوراني

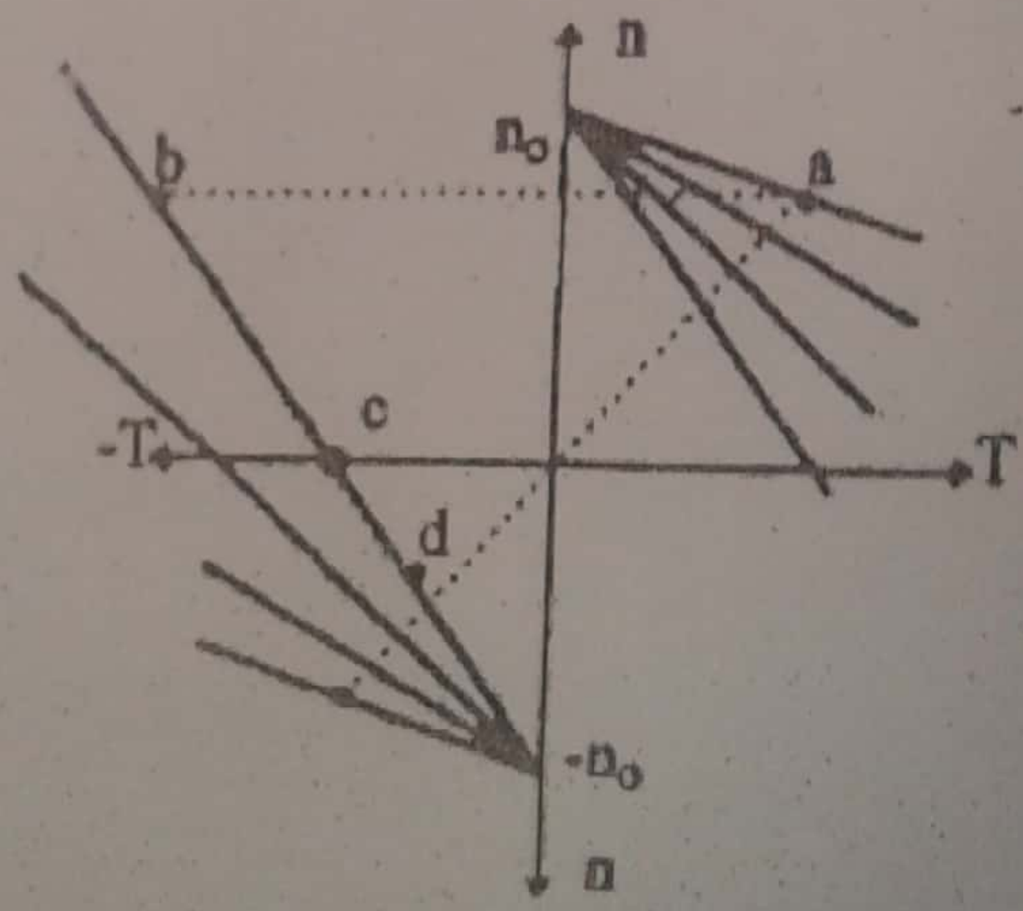
٢- **بعكس اشارة منبع التغذية:** تستعمل هذه الطريقة بشكل أساسي عندما يُراد إيقاف المحرّك بسرعة فائقة أوتغيير اتجاه دورانه. ويتم ذلك بعكس قطبية دارة المتحرّض (أو بعكس قطبية دارة التهييج و هي أقل استخداماً). ينعكس اتجاه دوران المحرّك نتيجة تغيير اتجاه التيار في المتحرّض ولكنه يبقى دائراً بالاتجاه السابق فترة وجيزة بفعل عطالته وعطالة الآلة الميكانيكية المربوطة معه، ويكون العزم في هذه الفترة مقاوماً للحركة مما يؤدي إلى انقاص سرعة الدوران حتى الصفر. اذا رغبنا بايقاف المحرّك نقوم

Scanned by CamScanner

نفصل التغذية عنه و تثبيته بكوابح ميكانيكية خاصة عند هذه النقطة أي n=0 أو قيمة قريبة منها و إلا سيغير المحرك جهة دورانه حتى تستقر سرعته في الاتجاه المعاكس عند نقطة تقاطع عزم الحمولة مع المميزات الميكانيكية للمحرك في الربع الثالث، الشكل (١١-٧) و الشكل (١١-٨).



الشكل (١١-٧): دارة توضيحية لعملية الفرملة على التضاد بعكس قطبية المتحرّض



الشكل (١١-٨): المميزات الميكانيكية لمحرك تفرعي في حالة الفرملة على التضاد

Scanned by CamScanner

من معادلة التوترات نجد أن التيار يصبح مساوياً إلى:

$$I_a = I_p = \frac{-U - E_b}{R_a} = -\frac{U + E_b}{R_a} \qquad (٨-١١)$$

نلاحظ أن قيمة التيار تقفز فجأة وتصبح كبيرة بحيث تخالف الشروط الحرارية للمحرك لذلك لا بد من إدخال مقاومة خارجية إلى دارة المتحرض خلال عملية الفرملة على التضاد ، يجب أن تكون هذه المقاومة ذات قيمة أكبر من قيمة مقاومة الاقلاع و تسمى بمقاومة الفرملة أو الكبح على التضاد R_p .

تصبح العلاقة العامة للمميزات الكهروميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل و التفرعي من الشكل:

$$\left.\begin{aligned} n &= -\frac{U}{C_e \cdot \Phi} + \frac{I_a (R_a + R_p)}{C_e \cdot \Phi} \\ \text{OR} \\ \omega &= -\frac{U}{C_m \cdot \Phi} + \frac{I_a (R_a + R_p)}{C_m \cdot \Phi} \end{aligned}\right\} \qquad (٩-١١)$$

كما تصبح العلاقة العامة للمميزات الميكانيكية لهذه المحركات من الشكل:

$$\left.\begin{aligned} n &= -\frac{U}{C_e \cdot \Phi} + \frac{T_a (R_a + R_p)}{C_m \cdot C_e \cdot \Phi^2} \\ \text{OR} \\ \omega &= -\frac{U}{C_m \cdot \Phi} + \frac{T_a (R_a + R_p)}{C_m^{\,2} \cdot \Phi^2} \end{aligned}\right\} \qquad (١٠-١١)$$

Scanned by CamScanner

يوضح الشكل (١١-٨) المميزات الميكانيكية لمحرك تفرعي في حالة الفرملة بالتضاد، حيث تنتقل، لحظة الفرملة، نقطة العمل من النقطة (a) إلى النقطة (b) أي المميزة bc في الربع الثاني. تبدأ سرعة المحرك بالتناقص، نتيجة لعزم الفرملة الذي يظهر فيه، على المميزة bc حتى يتوقف المحرك عن الدوران عند النقطة (c). في حال لم يتم قطع التغذية عن المحرك و تثبيتة فانه سيبدأ بالاكتساب سرعة بالاتجاه المعاكس لاتجاه دورانه. تستقر سرعته في الاتجاه المعاكس عند نقطة تقاطع عزم الحمولة مع المميزة الميكانيكية المناسبة في الربع الثالث. تعطى معادلة السرعة التي تمكننا من رسم المنحنيات الميكانيكية بالشكل الآتي:

$$\frac{n_0}{n} = \frac{U}{-U + (R_a + R_p) I_a} \qquad (11-11)$$

مثال

يملك محرك تيار مستمر ذو تهييج تفرعي المواصفات الفنية التالية:

P_n=21 Kw, U_n=220 Volts, I_n=113 A, n_n=980 r.p.m,
R_a=0,155 Ω

و المطلوب حساب المقاومة الخارجية R_r اللازم وصلها على التسلسل مع R_a للمحرك الذي يعمل بعزمه الاسمي، و ذلك في الحالات التالية:

١- في حالة الفرملة مع إعادة القدرة إلى الشبكة و بسرعة دوران 1200 r.p.m

٢- في حالة الفرملة الديناميكية و سرعة دوران 210 r.p.m

٣- في حالة الفرملة على التضاد و بسرعة دوران 210 r.p.m

ومن ثم ارسم المميزة الميكانيكية الطبيعية والمميزات الميكانيكية في حالات الفرملة المدروسة للمحرك.

الحـــل:

نحسب أولاً سرعة المحرك على فراغ وعزمه الاسمي.

سرعة المحرك على فراغ :

Scanned by CamScanner