جامعة المنارة
قسم هندسة الميكاترونكس

الآلات الكهربائية
Electrical Machines

4

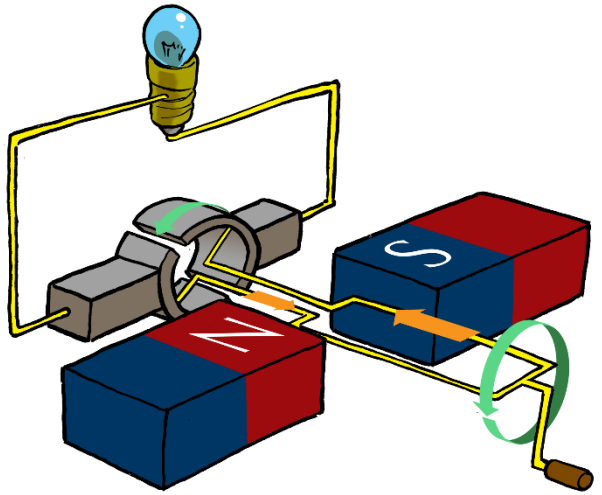
الدكتور المهندس
علاء الدين أحمد حسام الدين

مفردات المقرر

- مفاهيم عامة في الآلات الكهربائية.
- المحولات الكهربائية.
- آلات التيار المستمر.
- مبادئ عامة في آلات التيار المتناوب.
- الآلات التحريضية ثلاثية الأطوار.
- محركات الخطوة.
- محركات السيرفو.

آلات التيار المستمر

Direct Current Machines



مولدات التيار المستمر DC generator

وجدنا أن القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في آلة التيار المستمر تعطى بالعلاقة: $E = C_e \cdot \emptyset \cdot n$

من هذه العلاقة نجد أن القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في آلة التيار المستمر تتناسب طرداً مع سرعة الدوران ومع الفيض المغناطيسي لملف التهييج. في المولد يكون الجهد على طرفي المتحرض أقل من القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في ملف المتحرض بمقدار يساوي هبوط الجهد الداخلي على ملف المتحرض وعلى الفحمات وتماسات الانزلاق بين الفحمات والمجمع.

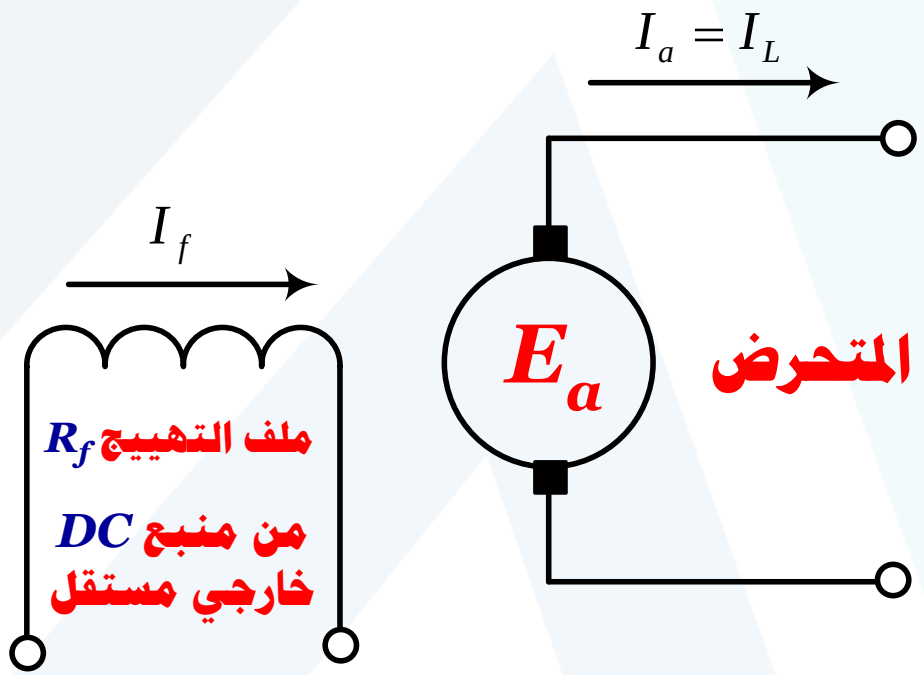
بإهمال هبوط الجهد على الفحمات والمجمع يكون هبوط الجهد على طرفي المتحرض يساوي:

$$V = E_a - I_a \cdot R_a$$

حيث: R_a، I_a مقاومة ملف المتحرض والتيار المار فيه.

في المولد ذي التهييج المستقل يتناقص الجهد بشكل خطي بزيادة تيار الحمولة، أو تيار المتحرض ($I_a=I_L$) بسبب زيادة هبوط الجهد الداخلي على مقاومة ملف المتحرض، ويكون:

$$V_f = R_f \cdot I_f$$
$$V_L = R_L \cdot I_L$$
$$V = V_L = V_a = E_a - I_a \cdot R_a$$
$$I_a = I_L = \frac{E_a - V}{R_a}$$



في المولد ذي التهييج التفرعي يتغذى ملف التهييج من المتحرض الموصول معه على التفرع. تكون مقاومة ملف التهييج كبيرة، ويمر فيه تيار صغير نسبياً مقارنة مع تيار المتحرض. كما أن هبوط الجهد على ملف المتحرض قليل نسبياً. تكون معادلات الاستقرار بالنسبة للمولد التفرعي المبين بالشكل كما يلي:

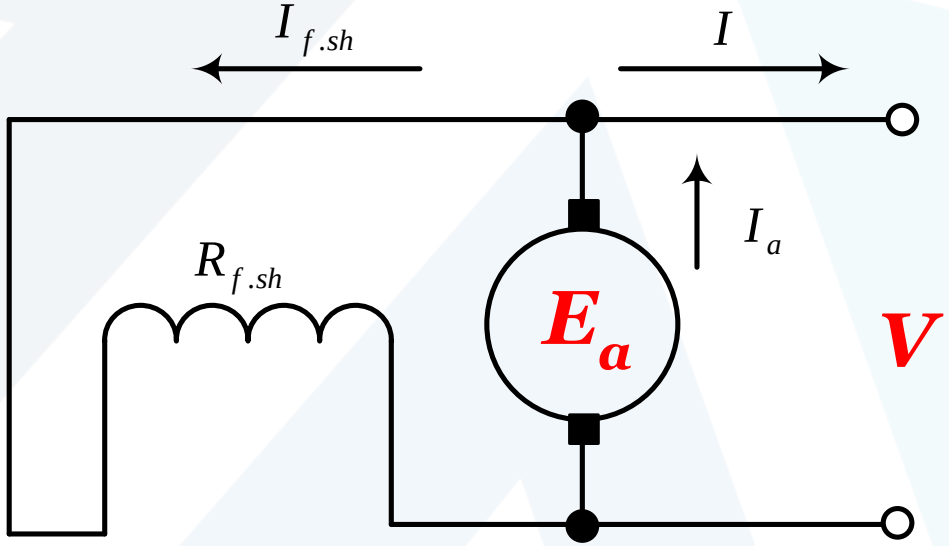
$$V_L = R_L \cdot I_L$$

$$V = V_L = V_a = E_a - I_a \cdot R_a$$

$$I_a = \frac{E_a - V}{R_a}$$

$$I_f = \frac{V}{R_{f.sh} - R_{f.reg}}$$

$$I_a = I_L + I_f$$

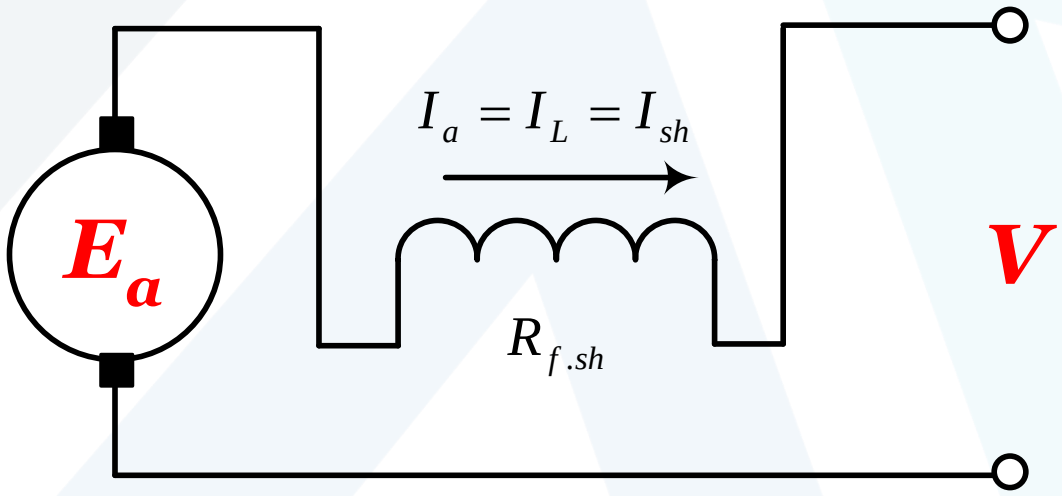


بما أن مقاومة ملف المتحرض صغيرة، لذا فإن انخفاض الجهد يكون قليلاً، ولهذا يتميز مولد التهييج المستقل والمولد التفرعي بثبات جهد الخرج على طرفيهما.

في المولد ذي التهييج التسلسلي يتغذى ملف التهييج من ملف المتحرض مباشرة، ويمر فيه تيار المتحرض بالكامل. ولذلك فإن الفيض المغناطيسي للآلة يتعلق بتيار الحمولة (لهذا السبب فإن للمولدات ذات التهييج التسلسلي استعمالات محددة فقط). وتكون معادلات الاستقرار لها:

$$V = E_a - I_a \cdot (R_a + R_{f.sh})$$

$$I_a = I_L = I_f = \frac{E_a - V}{R_a + R_{f.sh}}$$

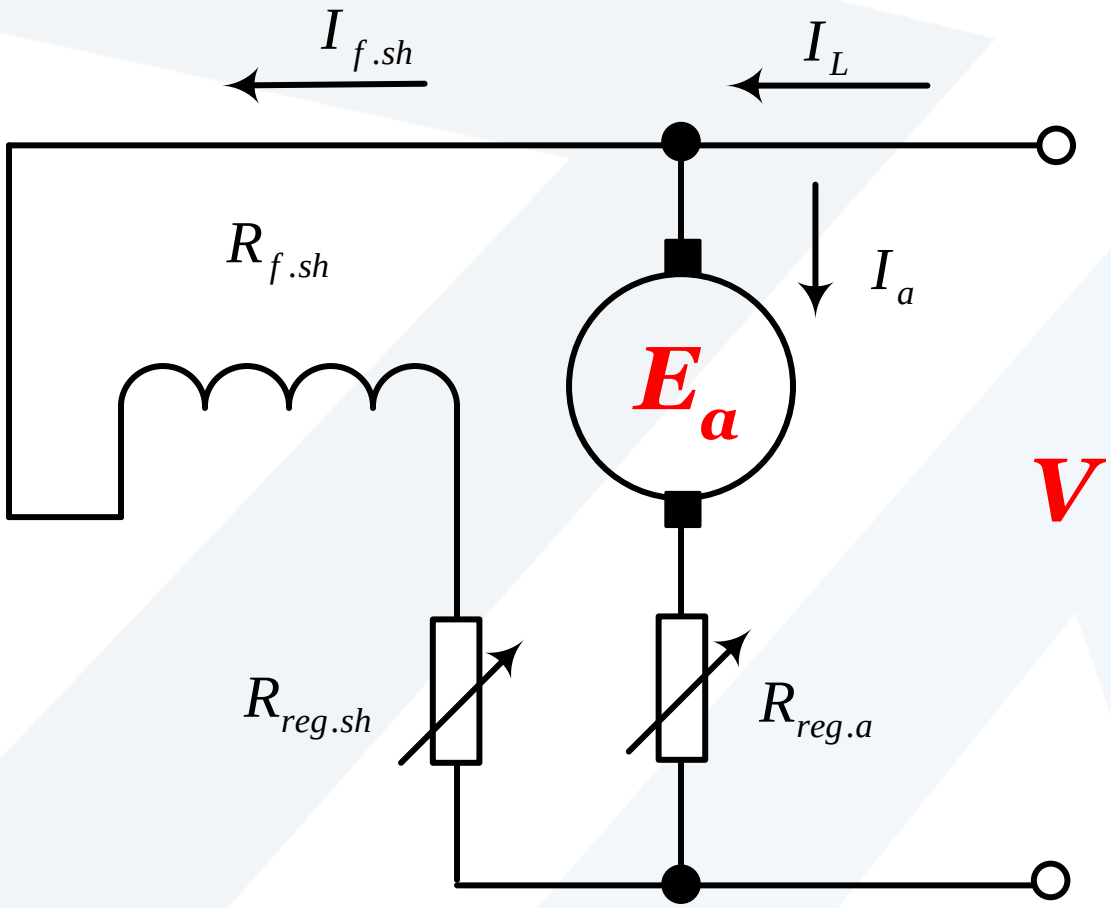


محركات التيار المستمر DC motors

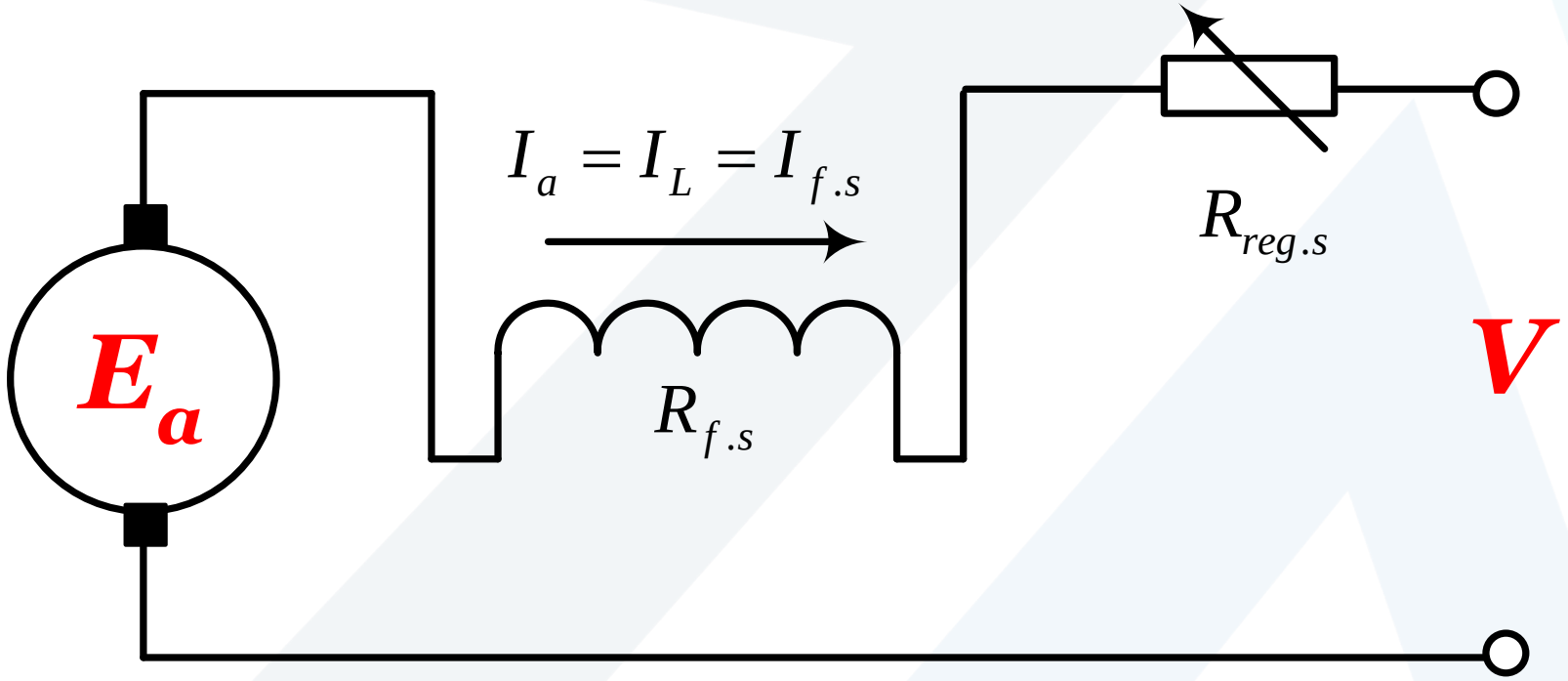
تستعمل محركات التيار المستمر في العديد من المعدات والتصاميم الهندسية نظراً لمميزاتها الميكانيكية (مميزة العزم-السرعة) الملائمة لمختلف شروط التشغيل. إذ يمكن تنظيم السرعة تنظيماً ناعماً، وعكس اتجاه الدوران بسهولة. وبما ان محركات التيار المستمر تتمتع بعزم كبير مقارنة مع عطالتها، لذلك تكون استجابتها سريعة. كما يمكن تشغيل هذه المحركات في أنظمة الكبح الديناميكي Dynamic braking حيث تصرف القدرة المستهلكة في مقاومة حرارية خارجية، وكذلك في نظام الكبح مع إعادة القدرة إلى الشبكة Regenerating braking حيث تسري القدرة في الاتجاه العكسي، أي من المحرك إلى منبع التغذية وذلك في الحالات التي تستدعي الضرورة إلى التوقف السريع والكفاءة العالية.

يبين الشكل التالي مخططات التوصيل الكهربائية لمحركات التيار المستمر التفرعية والتسلسلية والمختلطة، مع وجود مقاومات تنظيم R_{reg} في دارتي المتحرض والتهييج.

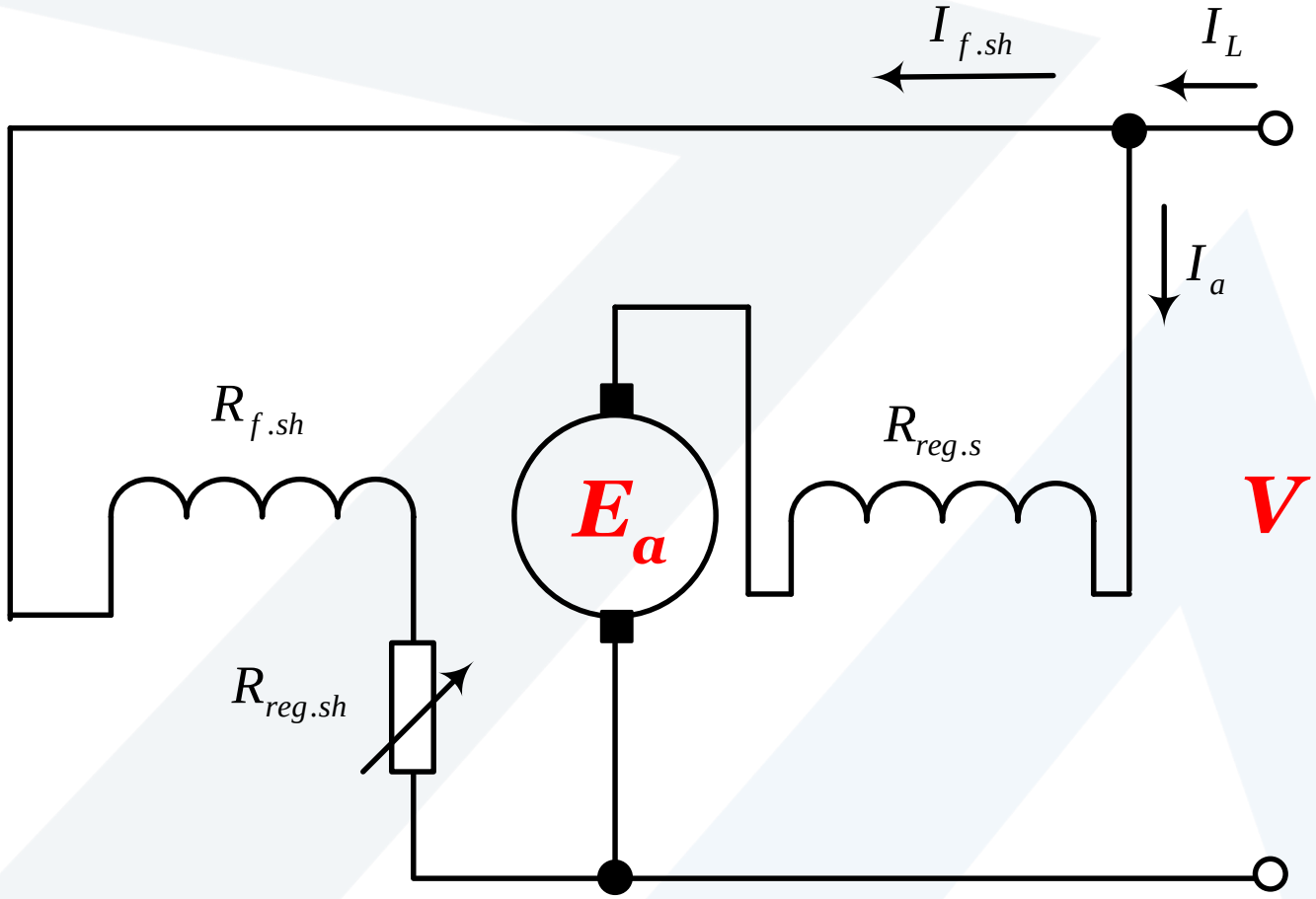
محركات تيار مستمر ذو تهييج تفرعي



محركات تيار مستمر ذو تهييج تسلسلي



محركات تيار مستمر ذو تهييج مختلط



القوة المحركة الكهربائية، والتيار، والعزم لمحرك التيار المستمر

E.M.F , Current and Torque DC motors

تعطى العلاقة بين القوة المحركة الكهربائية للمحرك، والمتحرضة في ملف المتحرض، وجهد التغذية:

$$V = E_a + I_a \cdot \sum R$$

حيث تكون القوة المحركة الكهربائية للمحرك، المتحرضة في ملف المتحرض أقل من جهد التغذية بمقدار يساوي هبوط الجهد الداخلي على المتحرض (على ملف المتحرض، وعلى مقاومات التنظيم الموصولة على التسلسل معه، وعلى ملف التهييج في المحرك التسلسلي). ويكون تيار المتحرض يساوي:

$$I_a = \frac{V - E_a}{\sum R}$$

ويكون العزم الكهرومغناطيسي عزماً دواراً مؤثراً باتجاه دوران المحرك، ويعطى بالعلاقة:

$$T = C_m \cdot \emptyset \cdot I_a = \frac{C_m \cdot \emptyset}{\sum R} \cdot (V - E_a)$$

$$T = \frac{C_m \cdot \emptyset}{\sum R} \cdot (V - C_e \cdot \emptyset \cdot n)$$

$$T = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{E_a \cdot I_a}{\omega}$$

نتعامل في الحياة العملية الهندسية عادة مع علاقة بسيطة لحساب عزم المحرك الكهربائي بدلالة الاستطاعة وسرعة الدوران الاسميين المدونين على اللوحة الاسمية للمحرك، وذلك كما يلي:

العزم المحسوب وفق هذه العلاقات هو العزم الدوراني المؤثر على محور الآلة، والمقدم للحمولة، ويسمى عادة بالعزم الخارجي للآلة.

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} \Rightarrow T = \frac{P_n}{\frac{2\pi \cdot n_n}{60}} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P_n}{n_n}$$

$$T = 9.55 \cdot \frac{P_n}{n_n}[N.m] = 0.973 \cdot \frac{P_n}{n_n}[kg.m]$$

حيث: P_n – الاستطاعة الاسمية [W].

n_n – سرعة الدوران الاسمية [r.p.m].

الضياعات والمردود: Losses and Efficiency

1. الضياعات في آلة التيار المستمر Losses in DC machine

تستهلك آلة التيار المستمر قدرة كهربائية (محرك) أو ميكانيكية (مولد) يضيع قسم منها داخل الآلة، ويذهب الجزء الأعظم إلى المستهلك. وتقسم الضياعات إلى ضياعات أساسية تنشأ بفعل الظواهر الكهرومغناطيسية والميكانيكية الأساسية، وضياعات إضافية تنشأ بفعل الظواهر الثانوية في الآلة.

أولاً : الضياعات الأساسية: تشمل كل من:

1. الضياعات الميكانيكية.
2. الضياعات الحديدية.
3. الضياعات الكهربائية.

1. الضياعات الميكانيكية Mechanical Losses

نرمز للضياعات الميكانيكية في الآلة الكهربائية بالرمز $\Delta P_{mec.}$ وهي تنتج عن ضياعات الاحتكاك وضياعات التهوية. تعطى الضياعات الميكانيكية بعلاقات تجريبية، وترتبط بشكل أساسي بسرعة الدوران، ولا تتعلق بالحمولة. تتراوح قيمة الضياعات الميكانيكية في آلات التيار المستمر ضمن المجال (0.5-2%) من استطاعتها الاسمية.

2. الضياعات الحديدية (الضياعات المغناطيسية) Iron Losses or Magnetic Losses

نرمز لها بالرمز ΔP_{Fe} وهي تنتج عن البطاء المغناطيسي (العروة المغناطيسية) Hysteresis Losses، وعن التيارات الاعصارية (تيارات فوكو) Eddy Current Losses في جميع اجزاء، وكذلك الضياعات الناتجة عن تعرج النواة المغناطيسية للمتحرض وللأقطاب، وذلك نتيجة تأرجح الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية أثناء مرور الأسنان والمجاري أمام القطب (يكون الفيض المغناطيسي أعظم ما يمكن عندما يمر السن أمام القطب، وأصغر ما يمكن عندما يمر المجرى أمام القطب).

تتعلق الضياعات الحديدية بشكل عام بالقوة المحركة الكهربائية، أو بالجهد وبالتردد بالنسبة للضياعات الناتجة عن تعرج النواة، لذلك فهي تنسب إلى الضياعات الثابتة في الآلة الكهربائية (لأنها ضياعات لا تتعلق بالحمولة).

3. الضياعات الكهربائية (الضياعات النحاسية) Electrical Losses

نرمز لها بالرمز ΔP_e أو ΔP_{cu} وتشمل الضياعات في ملف المتحرض، وملف الأقطاب المساعدة وملفات التهييج التفرعية والتسلسلية، وفي مقاومات التنظيم المختلفة.

a. الضياعات النحاسية في ملف المتحرض ΔP_{cu}:

وتضم ضياع ملف المتحرض نفسه، وملف الأقطاب المساعدة، وملفات التهييج التسلسلية، ومقاومة التنظيم المربوطة على التسلسل في دارة المتحرض، وتساوي:

$$\Delta P_{cu} = (R_a + \sum R) \cdot I_a^2$$

حيث: R_a المقاومة الداخلية لملف المتحرض.

$\sum R$ مجموع مقاومات ملفات الأقطاب المساعدة والتهييج ومقاومة التنظيم في دارة المتحرض.

b. ضياعات التهييج ΔP_f:

يقصد بها الضياعات النحاسية لملف التهييج التفرعي فقط، وتعطى بالعلاقة:

$$\Delta P_f = V_f \cdot I_f = R_f \cdot I_f^2$$

حيث: V_f جهد التهييج التفرعي.

I_f تيار التهييج التفرعي.

R_f مقاومة دارة التهييج التفرعية بما فيها المقاومة التسلسلية المربوطة في دارة التهييج التفرعية.

لا تتعلق هذه الضياعات بتيار الحمولة، ولذلك هي تعد من الضياعات الثابتة.

c. ضياعات الفحمات (المسفرات) ΔP_{br}:

تنسب هذه الضياعات إلى الضياعات الكهربائية، حيث يضيع قدرة لا بأس بها على مقاومة تماس المسفرات مع المبدلة، وتعطى للمسفرة الواحدة بالعلاقة: $\Delta P_{br} = \Delta V \cdot I$

حيث: ΔV هبوط الجهد على مسفرة (فحمة) واحدة.

I التيار المار في مسفرة واحدة. وبما أن عدد المسفرات يساوي غالباً عدد الدارات التفرعية، لذلك يمكننا حساب الضياع الكلي للمسفرات بالعلاقة: $\Delta P_{br} = 2 \cdot \Delta V \cdot I$

في الحسابات العملية تؤخذ قيمة ΔV على المسفرات مساوية حوالي 1V للمسفرات الفحمية، وحوالي 0.3V للمسفرات النحاسية الفحمية.

تتعلق الضياعات الكهربائية بتيار الحمولة، ولذلك تعد ضياعات المسفرات من الضياعات المتغيرة.

ثانياً : الضياعات الإضافية ΔP_d:

تنشأ هذه الضياعات عن أسباب ثانوية أثناء تحميل الآلة، لذلك تعد من الضياعات المتغيرة كونها تتعلق بتيار الحمولة.

تنشأ الضياعات الإضافية بفعل تشويه الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية نتيجة لعدم انتظام الثغرة الهوائية، أو نتيجة التشويه الناجم في الساحة المغناطيسية نتيجة رد فعل المتحرض، أو بسبب عدم انتظام توزيع التيار في ملف المتحرض. ويمكن التقليل من هذا النوع من الضياعات الإضافية أو القضاء عليها نهائياً باستعمال ملفات التعويض.

كما تنشأ الضياعات الإضافية بفعل ظاهرة التبديل، وتيار التبديل الناجم عن تغير الفيض القسري للوشائع حين انتقالها من صفيحة لأخرى.

في الحسابات العملية تؤخذ الضياعات الإضافية مساوية حوالي 1% للآلات من دون ملفات تعويض، وبحدود 0.5% للآلات مع ملفات تعويض.

الضياعات الكلية ΔP: Total Losses

هي مجموع الضياعات الميكانيكية والحديدية والكهربائية والإضافية في الآلة، وتعطى بالعلاقة:

$$\Delta P = \Delta P_{mec.} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{cu} + \Delta P_{f} + \Delta P_{br} + \Delta P_{d}$$

يمكن تقسيم هذه الضياعات إلى مجموعتين:

ضياعات ثابتة: تضم الضياعات الميكانيكية والحديدية وضياعات التهييج، وسميت بالثابتة لعدم علاقتها بتيار الحمولة، وتسمى أيضاً الضياعات على فراغ.

ضياعات متغيرة: تضم الضياعات النحاسية في دارة المتحرض وضياع المسفرات، وسميت متغيرة لعلاقتها المباشرة بتيار الحمولة.

المردود Efficiency

هو نسبة استطاعة الخرج P_2 (الاستطاعة المنتجة من الآلة) إلى استطاعة الدخل P_1 (الاستطاعة المستهلكة أو الداخلة إلى الآلة)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}$$

بالنسبة للمولد يعطى المردود بالعلاقة:

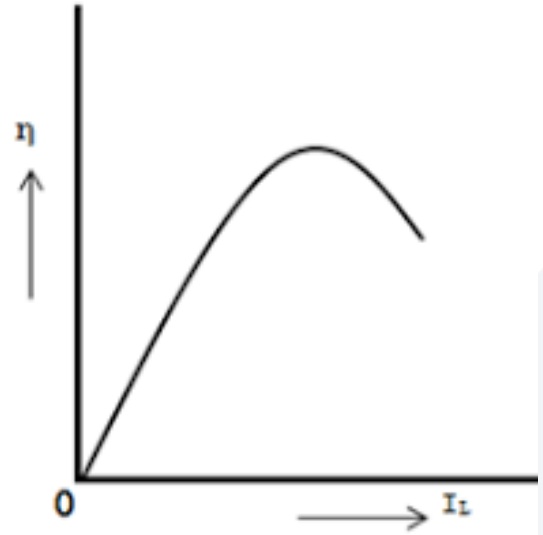
$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{V \cdot I + \Delta P}$$

حيث: V، I جهد وتيار الخرج للمولدة.

أما بالنسبة للمحرك فيعطى المردود بالعلاقة: $$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{V \cdot I}$$

حيث: V، I جهد الشبكة المغذية، والتيار الذي يسحبه المحرك من الشبكة.

يتعلق المردود بتيار الحمولة (أو تيار المتحرض)، ويأخذ منحني المردود الشكل المبين. ويزداد مردود آلات التيار المستمر كلما ازدادت استطاعتها، ويكون أعظمي عندما تكون الضياعات الثابتة P_0 مساوية للضياعات النحاسية المتغيرة للمتحرض.



$$P_0 = (R_a + \sum R) \cdot I_a^2$$

أي عندما يكون تيار المتحرض مساوياً: $$I_a = \sqrt{\frac{P_0}{R_a + \sum R}}$$

1. مولد تيار مستمر تفرعي، يعطي للحمولة تيار قيمته [A] 100 عندما يكون فرق الجهد على طرفيه مساوياً [V] 200، احسب قيمة القوة المحركة الكهربائية التي ينتجها المحرك إذا كانت مقاومة ملف المتحرض تساوي [Ω] 0.1، ومقاومة الملف التفرعي تساوي [Ω] 50.

2. مولد تيار مستمر بتهييج مختلط، يغذي حمل مقداره [A] 30 بجهد مقداره [V] 220، احسب قيمة القوة المحركة الكهربائية للمولد، واستطاعته بإهمال هبوط الجهد المسفرات إذا كانت مقاومة ملف المتحرض تساوي [Ω] 0.2، ومقاومة الملف التفرعي تساوي [Ω] 110، ومقاومة الملف التسلسل تساوي [Ω]0.3.

3. مولد تيار مستمر تفرعي يعطي للحمولة تياراً شدته [A] 195 عند جهد مقداره [V] 250.
بفرض أن مقاومة المتحرض تساوي [Ω] 0.05 ومقاومة ملف التهييج [Ω] 50 ، وبفرض أن ضياعات الحديد والاحتكاك تساوي [W] 1000، المطلوب:

1. احسب القوة المحركة الكهربائية لملف المتحرض.
2. احسب قيمة الضياعات النحاسية.
3. احسب استطاعة المحرك القائد الذي يدير المولد.
4. احسب مردود المولد.
5. احسب الاستطاعة الكهرومغناطيسية للمولد.