

**title: "مولدات التيار المستمر (DC Generators) author: "تجميع**  
**المحاضرات" date: "\today" geometry: margin=1in mainfont: "Segoe UI" monofont: "Consolas"**

## محاضرة (4): مولدات التيار المستمر (DC Generators)

### مقدمة

تستخدم مولدات التيار المستمر للحصول على جهد ثابت القيمة، وتعتبر تلك الآلات من أول الآلات الكهربائية التي تم تصنيعها للحصول على مصدر للطاقة الكهربائية.

### نظرية عمل المولد الكهربائي وتركيبه

يقوم مولد التيار المستمر بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية، ويتم ذلك عند إدارة المولد بسرعة محددة بواسطة أي بادئ حركة (مثل: محرك كهربائي، محرك ديزل، توربينة غازية أو مائية).

ويعتمد عمل المولد أساساً على قانون فاراداي للحث المغناطيسي والذي ينص على:

"تولد قوة دافعة كهربائية (جهد كهربائي) بين طرفي موصل عندما يقطع هذا الموصل خطوط المجال المغناطيسي".

أي تتولد قوة دافعة عندما توجد حركة نسبية بين الموصل وخطوط المجال المغناطيسي، ويتم ذلك عندما يكونا متعامدين، أما إذا كانا متوازيين فلا تتولد قوة دافعة.

تعتمد مقادير هذه القوة المركبة المتعامدة فقط هي المسؤولة عن توليد الجهد.

### حساب القوة الدافعة الكهربائية

تحسب القوة الدافعة الكهربائية من المعادلة الآتية:

$$e = B \cdot L \cdot V$$

حيث:

•  $B$ : كثافة الفيض المغناطيسي (وحدتها:  $Wb/m^2$ ).

- $L$ : طول اللفة بالمتري ( $m$ ).
- $V$ : السرعة الخطية ( $m/sec$ ).
- $e$ : القوة الدافعة الكهربائية المتولدة (وحدتها:  $Volt$ ).

## تركيب مولد التيار المستمر

تتكون ماكينة التيار المستمر من جزئين أساسيين هما:

1. **العضو الثابت:** وهو المسؤول عن توليد المجال المغناطيسي.
2. **العضو الدوار (المنتج - Armature):** وعنده تتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية وتتولد به القوة الدافعة الكهربائية.

### تفصيل العضو الثابت:

يتكون العضو الثابت من الأجزاء الآتية:

1. **الإطار الخارجي (Yoke):** وهو مصنوع من الحديد المطاوع أو الحديد الزهر (وفي بعض الآلات الصغيرة يُصنع من رقائق من الصلب).

- **وظيفته:** يعمل كمسار (هيكل) لاستكمال الدائرة المغناطيسية، ويتم تثبيت الأقطاب به.

2. **الأقطاب الرئيسية (Main Poles):** وتصنع من رقائق من الصلب، ويتم تثبيتها في الإطار الخارجي، ويركب عليها "حذاء القطب" الذي يعمل على توزيع وانتظام خطوط الفيض في الثغرة الهوائية. يوجد حول الأقطاب الرئيسية ملفات المجال، وتنقسم إلى:

- ملفات توازي.
- ملفات توالي. وهذه الملفات مسؤولة عن توليد المجال المغناطيسي.

3. **أقطاب التوحيد (Commutating Poles):** تشبه الأقطاب الرئيسية لكن حجمها أقل، وتوضع في المسافة بين الأقطاب الرئيسية.

- **الغرض منها:** تقليل المشاكل التي تصاحب عملية التوحيد في المنتج (تقليل الشرارة).

## محاضرة (5): مولدات التيار المستمر (DC) (Generators)

\* مواصلة:

أما العضو الدوار (المنتج) فيتكون من الآتي:

1/ قلب المنتج (**Armature Core**): وهو جزء أسطواني مصنوع من رقائق من الصلب ومضغوطة مع بعضها ومعزولة كهربائياً بواسطة طبقة رقيقة من الورنيش، وذلك لتقليل التيارات الدوامية.

2/ ملفات المنتج (**Armature windings**): عبارة عن مجموعات متعددة، والملف الواحد عبارة عن مجموعة من الموصلات، ويتم وضعها في مجاري المنتج. وتثبت الملفات داخل المجاري بواسطة عوازل، وذلك لحمايتها من القوة الطاردة المركزية، ويتم توليد ق.د.ك (قوة دافعة كهربائية) في هذه الملفات والتي تحمل تيار الحمل.

3/ الموحد (مبدل التيار) (**Commutator**): يعمل على تحويل التيار المتردد المتولد في ملفات المنتج إلى تيار موحد الاتجاه في الدائرة الخارجية. وهو أسطواني الشكل مصنوع من قطع من النحاس الصلد المسحوب، معزولة عن بعضها البعض بمادة عازلة جيدة (الميكال).

4/ حامل الفرش الكربونية (**Brushes holder**): مثبت في الإطار الخارجي للآلة، ويحمل الفرش الكربونية التي تلامس السطح الخارجي للموحد، وتعمل على تجميع التيار الكهربائي وتوصيله إلى الشبكة الخارجية (الحمل). وعادة عدد الفرش يساوي عدد الأقطاب الرئيسية.

\* طرق لف المنتج (**Armature winding**):

حسب طريقة التوصيل المتبعة فإنه يوجد هناك نوعان من اللف هما:

- 1- اللف الانطباقي (**Lap winding**): في هذا النوع يُوصل طرفا كل ملف إلى قطعتين بموحد متجاورتين.
- 2- اللف التموجي (**Wave winding**): تتثنى أطراف الملفات إلى الخارج، ويوصل طرفا كل ملف بقطعتين من الموحد بينهما عدد محدود من القطع.

## محاضرة (6): مولدات التيار المستمر (DC) (Generators)

### معادلة القوة الدافعة الكهربائية (EMF Equation)

يمكن الحصول على ق.د.ك (قوة دافعة كهربائية) بالتأثير الكهرومغناطيسي ديناميكياً، وذلك بتحريك موصل بالنسبة لمجال مغناطيسي، أو تحريك المجال المغناطيسي بالنسبة للموصل.

فمثلاً: عندما يتحرك موصل طوله  $L$  متر في مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه  $B$  (Tesla) بسرعة مقدارها  $V$  (m/sec) في اتجاه عمودي على خط المجال؛ تتولد على طرفي المجال (الموصل) ق.د.ك مقدارها  $e$  (volt).  
تبعاً لقانون فاراداي بحيث يكون:

$$e = B \cdot L \cdot V \quad \text{volt}$$

وباعتبار أن نصف قطر المنتج  $r$  (m)، فيمكن حساب السرعة من العلاقة:

$$V = \omega r = \frac{2\pi n r}{60}$$

حيث:

- $n$ : هي سرعة الدوران (لفة/دقيقة) (rpm).
- $\omega$ : هي السرعة الزاوية المحيطة (rad/sec).

وتحسب كثافة المجال المغناطيسي تحت القطب من العلاقة:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{\phi}{2\pi r L / 2p}$$

حيث:

- $A$ : المساحة تحت القطب.

وبالتعويض في المعادلات أعلاه نحصل على:

$$e = \frac{\phi \cdot 2p \cdot L}{2\pi r L} \cdot \frac{2\pi n r}{60}$$

ويمكن تبسيط المعادلة كالتالي:

$$e = \phi \frac{2pn}{60}$$

(هذه القوة الدافعة المتولدة في موصل واحد).

وإذا كان عدد الموصلات الكلية هو  $Z$ ، وعدد دوائر التوازي هو  $2a$ ، فإن ق.د.ك (القوة الدافعة الكهربائية) المتولدة في المنتج تحسب من العلاقة:

$$E_a = \frac{2p}{2a} \cdot \phi \cdot Z \cdot \frac{n}{60}$$

#### ملاحظات في نهاية المحاضرة:

- مثال (1) ومثال (2): ص 25 في مرجع المنهج السعودي (المرفق سابقاً).
- تنويه: المطبوع سوف يرسل إليكم.

بناءً على الإشارة الموجودة في نهاية المحاضرة رقم (6) للرجوع إلى ص 25 من المرجع المرفق (كتاب آلات التيار المستمر والمحولات - المنهج السعودي)، إليك نص الأمثلة وحلها كما وردت في الكتاب تماماً:

#### مثال (2-1)

مولد تيار مستمر عدد أقطابه 6، وعدد الموصلات الكلية 250، ملفوف لفا تموجياً (Wave winding) ويدور عند سرعة 1200 لفة/دقيقة. فإذا كان الفيض لكل قطب 4 ميغا خط (Megalines)، أوجد القوة الدافعة الكهربائية المتولدة.

**الحل:**

استخراج المعطيات:

- عدد الأقطاب  $2p = 6$
- نوع اللف تموجي، إذن عدد مسارات التوازي  $2a = 2$ .
- عدد الموصلات  $Z_a = 250$ .
- السرعة  $n = 1200$  rpm.
- الفيض  $\Phi = 4$  megalines (تحويلها للويبر:  $0.04 = 4 \times 10^6 \times 10^{-8}$  wb/pole).

التعويض في القانون:

$$E_a = \frac{2p}{2a} \cdot \phi \cdot Z_a \cdot \frac{n}{60}$$

$$E_a = \frac{6}{2} \times 0.04 \times 250 \times \frac{1200}{60}$$

$$E_a = 600 \text{ volt}$$

#### مثال (2-2)

مولد تيار مستمر عدد أقطابه 8، وعدد الموصلات الكلية 960، ملفوف لفا انطابقياً (Lap winding) ويدور عند سرعة 600 لفة/دقيقة. فإذا كانت القوة الدافعة الكهربائية المتولدة 220 فولت، أوجد الفيض المغناطيسي لكل قطب.

الحل:

استخراج المعطيات:

- عدد الأقطاب  $2p = 8$ .
- نوع اللف انطباقي، إذن عدد مسارات التوازي يساوي عدد الأقطاب ( $2a = 2p = 8$ ).
- عدد الموصلات  $Z_a = 960$ .
- السرعة  $n = 600$  rpm.
- الجهد المتولد  $E_a = 220$  V.

التعويض في القانون لإيجاد الفيض ( $\Phi$ ):

$$E_a = \frac{2p}{2a} \cdot \phi \cdot Z_a \cdot \frac{n}{60}$$

$$220 = \frac{8}{8} \times \phi \times 960 \times \frac{600}{60}$$

$$220 = 1 \times \phi \times 960 \times 10$$

$$\phi = \frac{220}{9600}$$

$$\Phi = 0.023 \text{ wb/pole}$$

## محاضرة (7): أنواع التغذية لمولدات التيار المستمر

### مقدمة

تحتاج مولدات التيار المستمر إلى وسيلة تغذية (تنبيه) لملفات المجال، وذلك لتوليد القوة الدافعة المغناطيسية (ق.د.م) اللازمة لتمغنط الآلة والحصول على قوة دافعة كهربية (ق.د.ك) عند الدوران. تستمد ملفات المجال التيار اللازم إما عن طريق مصدر جهد خارجي أو من الجهد المتولد من الآلة ذاتها.

وتنقسم من حيث طرق التغذية إلى:

1. مولدات ذات تغذية مستقلة (منفصلة).
2. مولدات ذاتية التغذية.

### أولاً: المولدات ذات التغذية المستقلة (Separately Excited Generators)

في هذا النوع، يتم توصيل ملفات التغذية المستقلة بمصدر خارجي. وتمتاز هذه النوعية بثبات تيار المجال وعدم اعتماده على تيار المنتج. كذلك يمكن الحصول على مدى واسع للجهد المتولد على أطراف الآلة.

#### الدائرة الكهربية والمكافئة:

(تم رسم دائرة توضح المنتج متصل بحمل  $R_L$ ، وملفات المجال متصلة ببطارية خارجية).

#### معادلات الجهد والتيار:

بتطبيق قانون كيرشوف على دائرة المنتج نحصل على:

$$E_g = V_L + I_a R_a$$

وتحسب القوة الدافعة الكهربية ( $E_g$ ) من المعادلة:

$$E_g = \frac{2P \cdot \phi \cdot Z \cdot n}{60 \cdot 2a}$$

وفي هذه الحالة يكون تيار المنتج مساوياً لتيار الحمل:

$$I_a = I_L$$

إشارة للمرجع: راجع مثال (2-3) ص 32 في المرجع (المنهج السعودي). (تم إدراج نص المثال وحله في نهاية التفريغ).

## ثانياً: مولدات التغذية الذاتية (Self Excited Generators)

تنقسم التغذية الذاتية تبعاً لطريقة توصيل ملفات المجال مع المنتج إلى ثلاثة أنواع هي:

1. تغذية توالي (Series).
2. تغذية توازي (Shunt).
3. تغذية مركبة (Compound).

### 1- مولدات التغذية التوالي (Series Wound Generators)

في هذا النوع، توصل ملفات المجال على التوالي مع المنتج والحمل.

المعادلات:

$$E_g = V_L + I_L(R_a + R_f)$$

$$I_a = I_f = I_L$$

حيث  $R_f$  هي مقاومة ملفات التوالي.

إشارة للمرجع: راجع مثال (2-4) ص 33. (تم إدراجه بالأسفل).

### 2- مولدات التغذية التوازي (Shunt Wound Generators)

في هذه الحالة يتم توصيل ملفات المجال بالتوازي مع ملفات المنتج.

المعادلات:

$$E_g = V_L + I_a R_a$$

$$V_f = V_L = I_f R_f$$

$$I_a = I_f + I_L$$

ملاحظة: عادة يتراوح تيار المجال في آلات التوازي من 1% إلى 5% من قيمة تيار المنتج، حيث تكون القيمة العليا للآلات الصغيرة القدرة.

إشارة للمرجع: راجع مثال (2-5) ص 34، و مثال (2-6) ص 35. (تم إدراجهم بالأسفل).

### 3- مولدات التغذية المركبة (Compound Wound Generators)

تحتوي هذه المولدات على ملفات توازي وملفات توازي، وتنقسم من حيث التوصيل إلى:

1. مركب قصير (Short Shunt).



2. مركب طويل (Long Shunt).

(أ) مركب قصير (Short Shunt): توصل ملفات التوازي مباشرة عبر أطراف المنتج.

المعادلات:

$$E_g = V_L + I_a R_a + I_L R_s$$

$$I_a = I_L + I_f$$

حيث  $R_s$  هي مقاومة ملفات التوالي.

(ب) مركب طويل (Long Shunt): توصل ملفات التوازي عبر أطراف الدائرة الخارجية (بعد ملفات التوالي).

المعادلات:

$$E_g = V_L + I_a (R_a + R_s)$$

$$I_a = I_L + I_f$$

ملحق: الأمثلة المشار إليها من المرجع (كتاب المنهج السعودي)

مثال (2-3) [في الكتاب هو مثال 3-2] ص 32:

**نص السؤال:** مولد تيار مستمر منفصل التغذية، يدور عند سرعة 1200 لفة/دقيقة ويغذي حمل ثابت المقاومة بتيار قيمته 200 أمبير عند جهد 125 فولت. احسب تيار الحمل إذا انخفضت السرعة إلى 1000 لفة/دقيقة، وباعتبار تيار المجال لم يتغير. علماً بأن مقاومة ملفات المنتج 0.04 أوم. **الحل المختصر:** يتم حساب  $E_{a1}$ ، ثم استخدام التناسب الطردي بين القوة الدافعة والسرعة ( $E \propto n$ ) لإيجاد  $E_{a2}$ ، ومن ثم حساب التيار الجديد. (الناتج النهائي للتيار: 166.62A).

مثال (2-4) [في الكتاب هو مثال 4-2] ص 33:

**نص السؤال:** مولد تيار مستمر توالي، عدد أقطابه 4 والقدرة المقننة 15 كيلو وات عند جهد 125 فولت وسرعة دوران 1150 لفة/دقيقة. مقاومة ملفات المجال 0.15 أوم ومقاومة ملفات المنتج 0.24 أوم. احسب الجهد على أطراف المولد عندما يدور بسرعة 1200 لفة/دقيقة ويغذي الحمل بتيار قيمته 125 أمبير. علماً بأن المجال المغناطيسي قد ارتفع بنسبة 30%. **الحل المختصر:** يتم حساب  $E_{a1}$ ، ثم استخدام علاقة التناسب ( $E \propto n \cdot \phi$ ) لإيجاد  $E_{a2}$ ، ومنها يتم حساب الجهد الطرفي الجديد  $V_{L2}$ . (الناتج النهائي للجهد: 184.3V).

مثال (2-5) [في الكتاب هو مثال 5-2] ص 34:

**نص السؤال:** مولد توازي يغذي حمل بتيار قيمته 350 أمبير عند جهد مقداره 240 فولت. فإذا كانت مقاومة ملفات المنتج والمجال على الترتيب هي 0.02 أوم و 55 أوم. احسب القوة الدافعة

المتولدة. **الحل المختصر:** يتم حساب تيار المجال  $I_f = V/R_f$ ، ثم تيار المنتج  $I_a = I_L + I_f$ ، وأخيراً التعويض في قانون الجهد  $E_a = V + I_a R_a$  (الناتج النهائي:  $247.1 V$ ).

### مثال (2-6) [في الكتاب هو مثال 2-6] ص 35:

**نص السؤال:** مولد تيار مستمر التوازي ملفوف لفا انطباقيا وعدد موصلات المنتج 500 موصل، مقاومة ملفات المنتج 0.01 أوم ومقاومة ملفات المجال 95 أوم، يغذي 200 لمبة قدرة كل منها 60 وات عند جهد 120 فولت. أوجد سرعة دوران المولد إذا كان الفيض المغناطيسي لكل قطب 0.02 ويبر. **الحل المختصر:** يحسب التيار الكلي للحمل من القدرة الكلية، ثم يحسب تيار المنتج، ثم القوة الدافعة الكهربية  $E_a$ . باستخدام قانون القوة الدافعة العام يتم إيجاد السرعة  $n$ . (الناتج النهائي: 726 rpm).

## محاضرة (8): الفقد والكفاءة في المولدات

### (Losses and Efficiency in DC Generators)

#### مقدمة

عند تحويل الطاقة الميكانيكية الداخلة للمولد إلى طاقة كهربائية على أطرافه، يُفقد جزء من هذه الطاقة، وتتحول الطاقة المفقودة عادة إلى طاقة حرارية في الآلة. والحرارة المتولدة تعمل على تسخين الآلة مما قد يتسبب في تلف المواد العازلة؛ ولذلك يجب الحد من الفقد في الآلة حتى نحصل على معامل جودة (كفاءة) مرتفع، وارتفاع الكفاءة يعني خفض تكاليف التشغيل للآلة.

أثناء تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية بواسطة المولد، يُفقد جزء من الطاقة في الدائرة المغناطيسية وجزء في الدائرة الكهربائية، علاوة على ذلك يُفقد جزء في صورة فقد ميكانيكي (احتكاكي).

#### أنواع المفاقد في المولد:

1. فقد الدائرة المغناطيسية (فقد الحديد - Iron Losses).
2. فقد الدائرة الكهربائية (فقد النحاس - Copper Losses).
3. فقد ميكانيكي (Mechanical Losses).

#### أولاً: المفاقد الحديدية (Magnetic Losses)

وتنقسم إلى:

1. مفاقد التخلفية المغناطيسية (Hysteresis Loss).
2. مفاقد التيارات الدوامية (Eddy Current Loss).

#### ثانياً: المفاقد النحاسية ( $I^2R$ Copper Losses)

وهي المفاقد الناتجة عن مرور التيار في ملفات الآلة، وتنقسم إلى:

1. مفاقد نحاسية في المنتج:  $I_a^2 R_a$ .
  2. مفاقد في ملفات المجال:  $I_f^2 R_f$  أو  $V_f I_f$ . (وهذا الفقد عادة ثابت القيمة في مولدات التوازي).
  3. الفقد نتيجة تلامس الفرش الكربونية: وقيمته  $I_a V_B =$ .
- حيث  $V_B$ : هو الجهد المفقود نتيجة تلامس الفرش الكربونية (Brush Contact Drop).

#### ثالثاً: المفاقد الميكانيكية (Mechanical Losses)

كما تسمى "فقد الاحتكاك"، وهي تنشأ نتيجة الاحتكاك في الكراسي (Bearing)، واحتكاك الفرش، وكذلك مقاومة الهواء (Windage) نتيجة دوران المنتج.

## مراحل القدرة للمولد (Power Stages)

القدرة الداخلة للمولد ( $P_{in}$ ) هي طاقة حركية من المحرك الأولي (Prime Mover) وتقدر بالحصان ( $H.P$ ).

• معلوم أن:  $1 H.P = 746 \text{ Watt}$ .

1. جزء من هذه الطاقة تضيع لتعويض الفقد الميكانيكي والحديدي ( $P_{mech} + P_{iron}$ ).

2. الباقي يتحول إلى قدرة كهرومغناطيسية ( $P_g$ )، وهي قدرة المنتج.

$$P_g = E_a I_a$$

$$P_g = P_{in} - (P_{mech} + P_{iron})$$

3. عند انتقال  $P_g$  يفقد جزء منها كمفاقد نحاسية ( $P_{cu}$ ).

4. وتكون القدرة المتبقية هي القدرة المستفادة (سقط) أو أحياناً تسمى خرج المولد ( $P_{out}$ ).

مخطط انسياب القدرة (Power Flow Diagram):

$$P_{in} \xrightarrow{\text{Losses (Mech + Iron)}} P_g \xrightarrow{\text{Losses (Copper)}} P_{out}$$

•  $P_{in}$ : قدرة الدخل (طاقة ميكانيكية).

•  $P_g$ : قدرة كهرومغناطيسية (داخل المنتج).

•  $P_{out}$ : قدرة الخرج (قدرة كهربائية).

## حساب الكفاءة (Efficiency Calculation)

يمكن حساب ثلاث كفاءات للمولد هي:

1. الكفاءة الميكانيكية ( $\eta_m$ ):

$$\eta_m = \frac{P_g}{P_{in}} = \frac{E_g I_a}{H.P \times 746}$$

2. الكفاءة الكهربائية ( $\eta_e$ ):

$$\eta_e = \frac{P_{out}}{P_g} = \frac{V_L \times I_L}{E_g I_a}$$

3. الكفاءة الكلية ( $\eta_{total}$ ): وهي حاصل ضرب الكفاءتين:

$$\eta_{total} = \eta_m \times \eta_e$$

$$\eta_{total} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_L \times I_L}{H.P \times 746}$$

## أمثلة من المرجع (المنهج السعودي)

تمت الإشارة في المحاضرة إلى مثال (8-2) ص 49 ومثال (9-2) ص 50.

## مثال (2-8) [في الكتاب المقرر]:

**نص السؤال:** مولد تيار مستمر مركب طويل، يدور بسرعة 1000 لفة/دقيقة ويغذي حمل قدرته 45 كيلووات عند جهد 240 فولت. فإذا كانت مقاومة ملفات المنتج 0.05 أوم ومقاومة التوالي 0.02 أوم ومقاومة التوازي 65 أوم. احسب الكفاءة لهذا المولد إذا كانت المفقودات الحديدية والميكانيكية 3500 وات.

## الحل باختصار (للتوضيح):

1. نحسب تيار الحمل:  $I_L = 45000/240 = 187.5A$
2. نحسب تيار المجال (توازي):  $I_{sh} = 240/65 = 3.7A$
3. تيار المنتج:  $I_a = 187.5 + 3.7 = 191.2A$
4. نحسب المفاقيد النحاسية الكلية (منتج + توالي + توازي):  $P_{cu} = I_a^2(R_a + R_{se}) + I_{sh}^2 R_{sh} \approx 3448W$
5. المفاقيد الكلية = مفاقيد نحاسية + (حديدية وميكانيكية)  $= 3448 + 3500 = 6948W$
6. القدرة الداخلة = القدرة الخارجة + المفاقيد  $= 45000 + 6948 = 51948W$
7. الكفاءة  $= (45000/51948) \times 100 \approx 86.6\%$

## مثال (2-9) [في الكتاب المقرر]:

**نص السؤال:** مولد مركب قصير عدد أقطابه 8 وملفوف لفا تموجيا، عدد موصلاته 1200 ويدور بسرعة 600 لفة/دقيقة، تيار المنتج 60 أمبير والفيض المغناطيسي 0.022 ويبر. مقاومة ملفات المنتج 0.06 أوم، مقاومة ملفات التوالي 0.04 أوم ومقاومة ملفات التوازي 250 أوم. أوجد الكفاءة إذا كانت المفقودات الميكانيكية والحديدية 4500 وات.

## الحل باختصار:

1. يتم حساب القوة الدافعة الكهربائية  $E_a$  من قانون المولد العام  $(E = \frac{2P\phi Z_n}{60 \cdot 2a})$ .
2. يتم حساب الجهود والتيارات في أفرع المركب القصير وصولاً لتيار الحمل  $I_L$  وجهد الحمل  $V_L$ .
3. تحسب القدرة الخارجة  $(P_{out} = V_L I_L)$ .
4. تحسب المفاقيد النحاسية وتجمع مع المفاقيد الثابتة.
5. تحسب الكفاءة  $= P_{out} / (P_{out} + Losses)$ . (الناتج النهائي في الكتاب 87.6%).