دراسة الحالات العابرة في المحركات التحريضية ثلاثية الطور عند تغذيتها بتوترات غير جيبية

الدكتور هاكوب بوغوص[1] **الدكتور علي الجازي[2]**

الملخص

تم في هذا البحث وبالاعتماد على النظرية العامة للآلات الكهربائية وضع نموذج رياضي للمحركات التحريضية ثلاثية الطور عن طريق مجموعة من المعادلات التفاضلية التي تصف عمل المحرك وأداءه، وتأخذ بالحسبان شكل الساحة المغناطيسية في الفجوة الهوائية نتيجة التوافقيات المختلفة المتشكلة في هذه الساحة، والناتجة عن تغذية المحرك بتوترات غير جيبية.

لقد أُجريت نمذجة المحرك بواسطة برنامج (Matlab)، والتي بواسطتها دُرست الحالات العابرة التي تحدث في هذه المحركات وذلك عند التغذية الجيبية وغير الجيبية، كما حُددت مختلف دلائل ومميزات المحرك كالعزم، السرعة، الاستطاعة الفعلية والردّية التي يستجرها، المردود وعامل الاستطاعة. فضلاً عن ذلك تم تحديد تاثير التوافقيات المختلفة الموجودة في موجة التوتر المغُذي في قيم تيارات وعزوم الصدمة وزمن الحالة العابرة، ومن ثَمَّ تأثيرها في تشكل العزوم النبضية والاهتزازات التي تنتج عنها، والتي تسيء إلى أداء المحرك. وقد تم التطرق أيضاً إلى عملية تبادل الطاقة بين كل من المحرك والمنبع وبين التوافقية الأساسية والتوافقيات العليا، وذلك من خلال ملاحظة المنحنيات التي تبين تغيرات الاستطاعات وعامل الاستطاعة في الحالة العابرة والتي تؤدي دوراً مهماً في مسألة اقتصاد وتوفير الطاقة الكهربائية. و أُجريت كذلك مقارنة بين مختلف المميزات والدلائل عند تغذية المحرك بتوترات جيبية وغير جيبية.

[1] أستاذ– قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق.

[2] مدرس– قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق.

- مقدمة:

يمكن تعريف الحالة العابرة بأنّها حالة انتقالية بين حالتي استقرار متعاقبتين لنظام ما. كأن يمثل هذا النظام عمل المحرك عند إقلاعه أو تغيير الحمل عليه بشكل مفاجئ أو تغيير أحد عناصره أو تغييراً في توتر الشبكة.

إن حدوث الحالة العابرة في المحركات التحريضية يؤدي إلى حدوث تيارات صدمية يمكن أن تصل قيمتها إلى عدة أضعاف التيار الاسمي، وهذه التيارات العابرة تؤدي بدورها إلى نشوء قوى كهروديناميكية على الأجزاء الجبهوية للملفات بحيث يمكن أن تتلفها.كما تظهر في أثناء الحالة العابرة اهتزازات في العزم الناتج على محور المحرك، وهذه الاهتزازات قد تكون غير متخامدة مما يؤدي إلى عمل غير مستقر للنظام ، أما العزوم الصدمية الناشئة فإنها قد تؤثر في محور دوران الآلة.

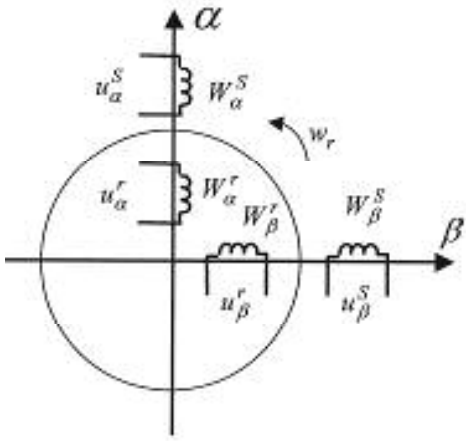
إن مسألة اقتصاد الطاقة الكهربائية وتوفيرها تزداد أهمية سنة بعد سنة لأن عدد المحركات التي تستهلك هذه الطاقة تزداد أيضاً، لذا فإن تحديد الاستطاعة الفعلية والردّية في الحالات العابرة للمحركات التحريضية وبعد الأخذ بالحسبان وجود العدد اللامتناهي من التوافقيات في موجة الساحة المغناطيسية في الفجوة الهوائية وعدم خطية العناصر فيها تكتسب أهمية كبيرة.

لهذا كله نجد من الضروري إجراء دراسة دقيقة للحالات العابرة التي تحدث في المحركات التحريضية وذلك لتحديد آثارها على استثمار هذه المحركات وتصميمها.

1- خصائص التشغيل في الحالات العابرة عند التغذية الجيبية:

إن الظواهر المرافقة للحالات العابرة معقدة بحيث إنَّ الدراسة الرياضية للآلة دون فرضيات وتبسيطات تكاد تكون مستحيلة وغير ممكنة، وتنجم الصعوبة عن عدم خطية منحنى المغنطة وعدم خطية عناصر الآلة وعلاقتها بقيم التيارات المارة في الملفات وكذلك عدم التوزع الجيبي لمنحنى الساحة المغناطيسية وتغيرها حسب أنظمة عمل الآلة **[1,2]**.

تسهيلاً لذلك ولتمثيل الآلة الحقيقية والظواهر المعقدة التي تحدث فيها في أثناء الحالة العابرة ،تُعتمد النظرية العامة للآلات الكهربائية **[3,4,5]** التي تقوم بتمثيل الآلة الحقيقية بآلة أخرى نموذجية مكافئة بحيث تكون الحوادث الفيزيائية في هذه الآلة النموذجية مشابهة لتلك التي تحدث في الآلة الحقيقية . تكون هذه الآلة النموذجية المثالية ثنائية الأقطاب بسبب أن توزع التحريض المغناطيسي يتكرر تحت كل قطبين دون علاقة بعدد الأقطاب الموجودة في الآلة الفعلية ، كما تتألف من ملفين (طورين) متناظرين موجودين على محورين متعامدين α,β في كل من الثابت والدائر وذلك كما هو مبين في الشكل(1).



الشكل (1)

فحسب الشكل (1) يستبدل المحرك التحريضي ثلاثي الطور بآلة ثنائية الأقطاب فيها لكل من الثابت والدائر زوج من الملفات على المحورين α,β الثابتين والمتعامدين ويدور الجزء الدوار فيها بسرعة w_r في حين الساحة المغناطيسية الدوارة تدور بسرعة w_1 نتيجة مرور تيارات متناوبة مزاحة بـ 90 درجة حسب الزمن في ملفات الثابت، أي أنه عندما تمر موجة السيالة على المحور α بنقطة الصفر تمر الموجة

على المحور β بقيمة عظمى والعكس صحيح . بينما ملفات الثابت w_α^s , w_β^sفمزاحة فراغياً عن بعضها بمقدار 90 درجة. عندها يمكن كتابة المعادلات التفاضلية التي تصف عمل المحرك كالآتي: [6]

- معادلات التوتر

$$
\begin{aligned}
u_\alpha^s &= R^s \cdot i_\alpha^s + L^s \frac{di_\alpha^s}{dt} + M \frac{di_\alpha^r}{dt} \\
u_\beta^s &= R^s \cdot i_\beta^s + L^s \frac{di_\beta^s}{dt} + M \frac{di_\beta^r}{dt} \\
0 &= R^r \cdot i_\alpha^r + L^r \frac{di_\alpha^r}{dt} + M \frac{di_\alpha^s}{dt} + w_r (L^r \cdot i_\beta^r + M \cdot i_\beta^s) \\
0 &= R^r \cdot i_\beta^r + L^r \frac{di_\beta^r}{dt} + M \frac{di_\beta^s}{dt} - w_r (L^r \cdot i_\alpha^r + M \cdot i_\alpha^s)
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

نعيدُ كتابة المعادلات السابقة بالشكل الذي سيتم استخدامها في تمثيل (نمذجة) المحرك التحريضي.

$$
\begin{aligned}
\frac{di_\alpha^s}{dt} &= \frac{1}{L^s} u_\alpha^s - \frac{R^s}{L^s} i_\alpha^s - \frac{M}{L^s} \frac{di_\alpha^r}{dt} \\
\frac{di_\beta^s}{dt} &= \frac{1}{L^s} u_\beta^s - \frac{R^s}{L^s} i_\beta^s - \frac{M}{L^s} \frac{di_\beta^r}{dt} \\
\frac{di_\alpha^r}{dt} &= -\frac{R^r}{L^r} i_\alpha^r - \frac{M}{L^r} \frac{di_\alpha^s}{dt} - w_r (i_\beta^r + \frac{M}{L^r} i_\beta^s) \\
\frac{di_\beta^r}{dt} &= -\frac{R^r}{L^r} i_\beta^r - \frac{M}{L^r} \frac{di_\beta^s}{dt} + w_r (i_\alpha^r + \frac{M}{L^r} i_\alpha^s)
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

تجدر الملاحظة أن أي جداء للتيارات والتوترات في النموذج الرياضي الممثل للمحرك له معنى فيزيائي لأن هذا النموذج يعكس حوادث تحول الطاقة في الآلة الكهربائية.

فالعزم الكهرومغناطيسي يتحدد بجميع التراكيب التي تحوي جداءات التيارات التي تمر بملفات الثابت والدائر .فالتركيب $\frac{3}{2}pM(i_\alpha^r \cdot i_\beta^s - i_\alpha^s \cdot i_\beta^r)$ يحدد العزم الدوراني T_{rot} المتولد على محور المحرك التحريضي ، أما جداءات التيارات في كل من الثابت والدائر وعلى المحور نفسه $\frac{3}{2}pM(i_\alpha^s.i_\alpha^r - i_\beta^s.i_\beta^r)$ فتحدد العزوم النبضية أو الاهتزازية T_{pulse} التي تظهر في المحرك وهذه العزوم إن وجدت بقيم كبيرة تعمل على إطالة زمن الإقلاع وزيادة الاهتزازات في موجة العزم. كما أن الجداءات $\frac{3}{2}pM(i_\alpha^s \cdot i_\beta^s + i_\alpha^r \cdot i_\beta^r)$ يمكن اعتبارها وكأنها تنتج عزوماً نسميها بالعزوم المشوهة T_{def} والتي تؤثر بشكل أساسي في الأجزاء الجبهوية لملفات الثابت والدائر ولكنها تستخدم عادة عند تحديد الوثوقية في الآلة وتشكل جزءاً لايؤثر في الآلة. أي أنه في المحصلة تصبح **معادلة العزوم الكهرومغناطيسية** المتولدة كالآتي:

$$T_{em} = T_{rot} + T_{pulse} + T_{def}$$

$$T_{em} = \frac{3}{2}pM[(i_\alpha^r \cdot i_\beta^s - i_\alpha^s \cdot i_\beta^r) + (i_\alpha^s \cdot i_\alpha^r - i_\beta^s \cdot i_\beta^r) + (i_\alpha^s \cdot i_\beta^s + i_\alpha^r \cdot i_\beta^r)] \qquad (3)$$

أما **معادلة الحركة** فهي بالشكل الآتي:

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{p}{J}(T_{em} - T_c) \qquad (4)$$

وكما ذكرنا فإن تحديد الاستطاعة الفعلية والردّية في الحالات العابرة تعدُّ مسألة حيوية وتزداد أهمية مع مرور الزمن ويمكن تحديدها من النموذج الرياضي الممثل للمحرك، ففيه كما لجداءات التيارات معنى فيزيائي فإنه لجداء التوترات بالتيارات أيضاً معنى، فحاصل جمع جداءات التيارات والتوترات على المحور نفسه $u_\alpha^s \cdot i_\alpha^s + u_\beta^s \cdot i_\beta^s$ يحدد **الاستطاعة الفعلية** المستجرة من الشبكة، وإذا كان في بعض الحالات (حالة محرك تحريضي ذي دائر ملفوف) تطبق على الدائر أيضاً قوة محركة كهربائية فإنه يجب الأخذ بالحسبان حاصل جمع جداء التوترات والتيارات $u_\alpha^r \cdot i_\alpha^r + u_\beta^r \cdot i_\beta^r$ والتي تمثل

الاستطاعة الحقيقية المستجرة من طرف الدائر في الحالة العابرة، كما أن $u_\alpha^s \cdot i_\beta^s - u_\beta^s \cdot i_\alpha^s$ تمثل **الاستطاعة الردّية** التي يستجرها المحرك التحريضي من الشبكة في الحالة العابرة والتي تذهب لتشكيل السيالة المغناطيسية في المحرك، وفي حال تغذية المحرك من جهة الثابت والدائر معاً فإن مسالة تحديد الاستطاعة الردّية تصبح صعبة بعض الشيء إذ يجب الأخذ بالحسبان كذلك $u_\alpha^r \cdot i_\beta^r - u_\beta^r \cdot i_\alpha^r$. أما **الاستطاعة الكلية** اللحظية فتساوي: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

مما سبق يمكن أيضاً تحديد القيم اللحظية **لمردود** المحرك η و القيم اللحظية **لعامل الاستطاعة** $\cos\varphi$ حيث إنَّ لهذه القيم في الحالات العابرة أهمية كبيرة وأكبر منها في الحالات المستقرة ، فالمردود يعطى بالعلاقة التية: $\eta = \frac{P_2(t)}{P_1(t)}$.

حيث: $P_2(t)$ الاستطاعة الميكانيكية على محور الآلة وتحدد بالعلاقة :

$$P_2(t) = M \cdot \Omega_r$$

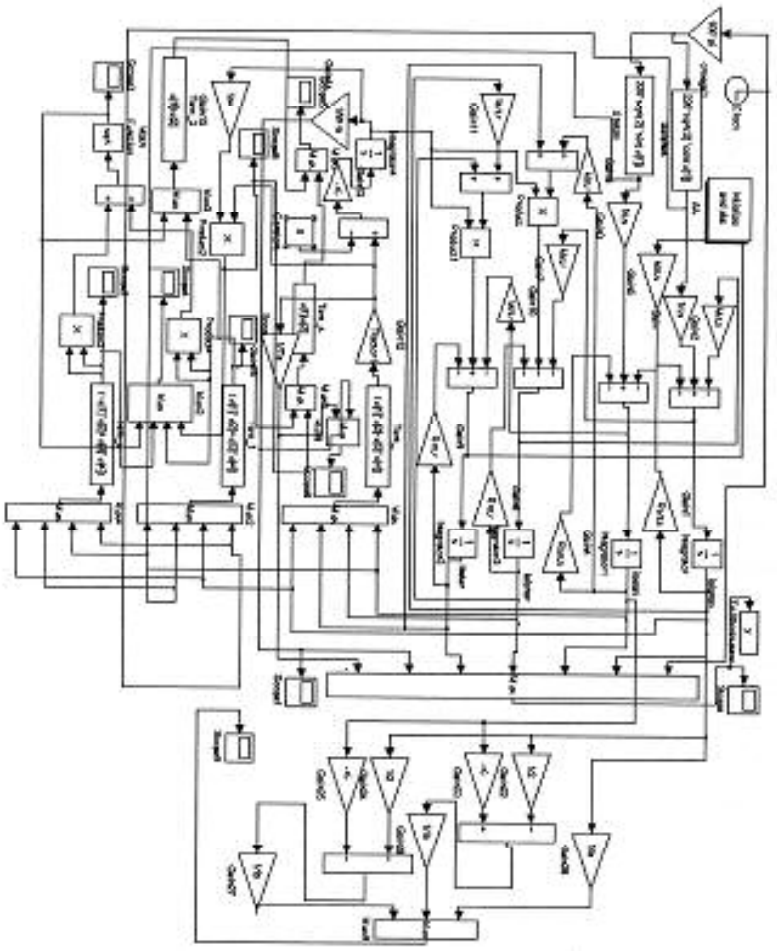
Ω_r السرعة الزاوية الميكانيكية اللحظية.

أما عامل الاستطاعة فيعطى بالعلاقة الآتية: $\cos\varphi_1 = \frac{P_1(t)}{S(t)}$

وتيارات الأطوار الثلاثة تعطى بالعلاقات الآتية:

$$\begin{aligned} i_A^s &= i_\alpha^s \\ i_B^s &= \frac{1}{2} i_\alpha^s - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta^s \\ i_C^s &= -\frac{1}{2} i_\alpha^s - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta^s \end{aligned} \qquad (5)$$

والشكل(2) يبين المخطط الصندوقي لنموذج المحرك المستخدم والذي يتم تمثيله (نمذجته) باستخدام برنامج (Matlab). [7,8,9]



الشكل(2)

المخطط الصندوقي لنموذج المحرك المستخدم في حالة التغذية الجيبية

وبعد النمذجة والتمثيل الرياضي لمحرك له المعطيات الاسمية الآتية:

$P_n = 30\ kW$	$R_s = 0.159\ \Omega$	$M = 0.0489\ H$
$2p = 4\ poles$	$R_r = 0.078\ \Omega$	$J = 0.234\ kg.m^2$
$U_n = 220\ V$	$L_s = 0.05\ H$	
$n_n = 1410\ r.p.m$	$L_r = 0.051\ H$	

وبعد الأخذ بعين الاعتبار الظاهرة القشرية التي تحدث في هذا المحرك والتي تأخذ في حسابها تغير R^r في المرحلة العابرة كما في الجدول الآتي:

R^r	0.134	0.128	0.123	0.117	0.111	0.105	0.098	0.09	008	0.078
w_r	0	15.7	31.7	47.1	92.8	78.5	94.2	110	125.6	157

حصلنا على المنحنيات المبينة في الأشكال الآتية:

حيث:

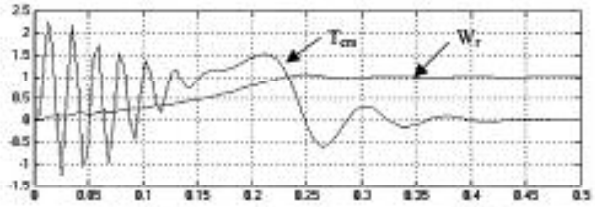
1- الشكلان (3-a) و(3-b) يمثلان منحنى (عزم – سرعة) خلال المرحلة العابرة في حالتي اللاحمل والتحميل.

2- والشكلان(4-a) و (4-b) يبينان منحنيات التيارات iA , iB , iC خلال المرحلة العابرة في حالتي اللاحمل والتحميل .

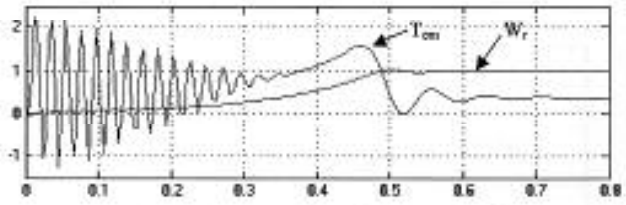
3- أما الشكلان(5-a) و (5-b) فيبينان منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية والكلية المستجرة من الشبكة وكذلك الاستطاعة الميكانيكية المتولدة على محور المحرك وذلك في المرحلة العابرة .

4- والشكل (6-a) و (6-b) يبينان منحنيات المردود وعامل الاستطاعة في تلك المرحلة.

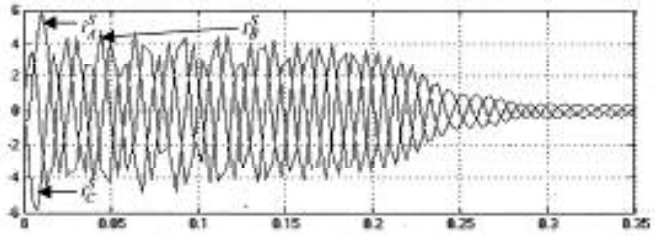
حيث يلاحظ أن قيم عزوم الصدمة تتجاوز ضعفي العزم الاسمي للمحرك كما تصل قيم تيارات الصدمة ستة أضعاف التيار الاسمي وكذلك الشيء نفسه بالنسبة للاستطاعات المستجرة، إذ تصل قيمة الاستطاعة الفعلية المستجرة لحظة تطبيق التوتر على المحرك زهاء ضعفي الاستطاعة الاسمية المستجرة وكذلك الشيء نفسه بالنسبة للاستطاعة الردية.



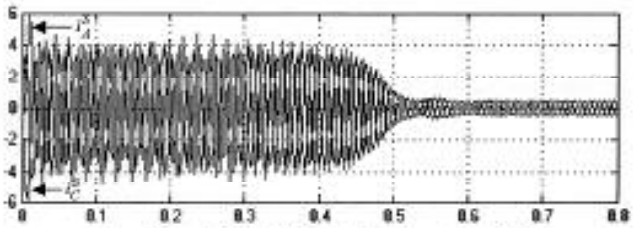
الشكل(3-a) منحنيات العزم و السرعة في حالة اللاحمل



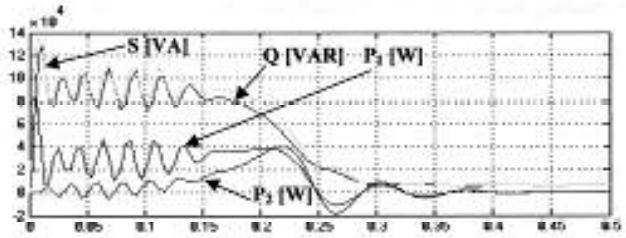
الشكل(3-b) منحنيات العزم و السرعة في حالة التحميل



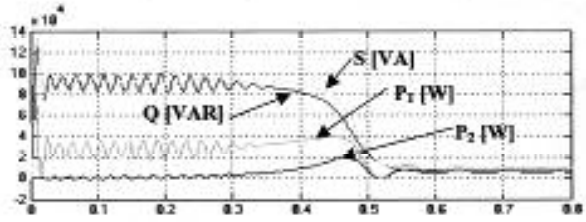
الشكل(4-a) منحنيات تيارات الأطوار الثلاثة في حالة اللاحمل



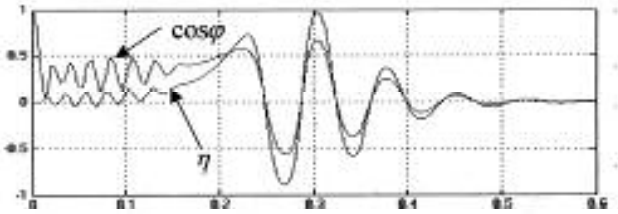
الشكل(4-b) منحنيات تيارات الأطوار الثلاثة في حالة التحميل



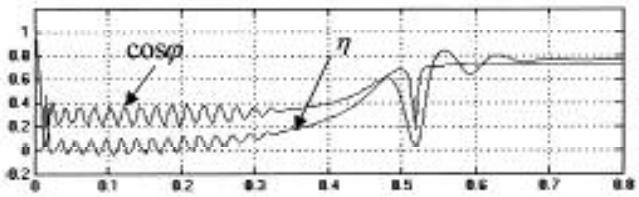
الشكل(5-a) منحنيات الاستطاعات في حالة اللاحمل



الشكل(5-b) منحنيات الاستطاعات في حالة التحميل



الشكل(6-a) منحنيات المردود و عامل الاستطاعة في حالة اللاحمل



الشكل(6-b) منحنيات المردود و عامل الاستطاعة في حالة التحميل

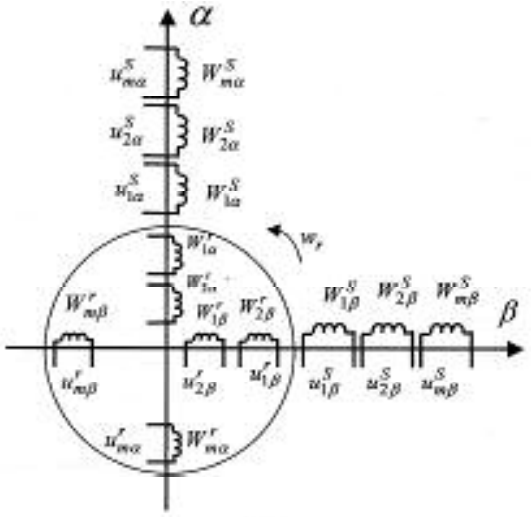
2– خصائص التشغيل في الحالات العابرة عند التغذية بتوترات غير جيبية:

إن التوتر المغذي للمحركات التحريضية يكون عادة غير جيبي، فهو يمكن أن يأتي من خرج مبدلة ثايرستورية، وأحياناً حتى توتر الشبكة المغذية يكون غير جيبي.

عند دراسة المحركات التحريضية التي تتغذى بهذه التوترات، نفترض أيضاً أن الآلة مثالية وشكل التحريض المغناطيسي في الفجوة الهوائية يكرر شكل التوتر المطبق. وحتى نوجد التحليل التوافقي للساحة المغناطيسية يكفي أن نحلل التوترات الطورية إلى توافقياتها.

سنعدُّ أن كل توافقية من توافقيات الساحة المغناطيسية تتشكل نتيجة زوج من الملفات موجودة في كل من الثابت والدائر وعلى المحاور α, β.

إن النموذج الفراغي لآلة كهذه مبين في الشكل (7) إذْ يتألف من m ملفاً في كل من الثابت والدائر وعلى المحاور α, β .[6]



الشكل(7)

حيث:

$u^s_{1\alpha}, u^s_{1\beta}$ التوتر على الثابت للتوافقية الأساسية ذات التردد f_1.

$u^s_{2\alpha}, u^s_{2\beta}$ التوتر على الثابت للتوافقية الثالثة ذات التردد $f_3=3f_1$.

$u^s_{m\alpha}, u^s_{m\beta}$ التوتر على الثابت للتوافقية ذات المرتبة m والتي ترددها $f_m=mf_1$.

وكل زوج من الملفات في الثابت يقابلها زوج في الدائر.

عندها تأخذ معادلات التوتر الشكل الآتي:

$$\sum_{m=1}^{\infty} u^s_{\alpha m} = R_S \sum_{m=1}^{\infty} i^s_{\alpha m} + L_S \frac{d}{dt} \sum_{m=1}^{\infty} i^s_{\alpha m} + M \frac{d}{dt} \sum_{m=1}^{\infty} i^r_{\alpha m}$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} u^s_{\beta m} = R_S \sum_{m=1}^{\infty} i^s_{\beta m} + L_S \frac{d}{dt} \sum_{m=1}^{\infty} i^s_{\beta m} + M \frac{d}{dt} \sum_{m=1}^{\infty} i^r_{\beta m} \qquad (6)$$

$$0 = R_S \sum_{m=1}^{\infty} i^r_{\alpha m} + L_r \frac{d}{dt} \sum_{m=1}^{\infty} i^r_{\alpha m} + M \frac{d}{dt} \sum_{m=1}^{\infty} i^s_{\alpha m} - M \cdot w_r \sum_{m=1}^{\infty} i^s_{\beta m} - L_r \cdot w_r \sum_{m=1}^{\infty} i^r_{\beta m}$$

$$0 = R_r \sum_{m=1}^{\infty} i^r_{\beta m} + L_r \frac{d}{dt} \sum_{m=1}^{\infty} i^r_{\beta m} + M \frac{d}{dt} \sum_{m=1}^{\infty} i^s_{\beta m} + M \cdot w_r \sum_{m=1}^{\infty} i^s_{\alpha m} + L_r \cdot w_r \sum_{m=1}^{\infty} i^r_{\alpha m}$$

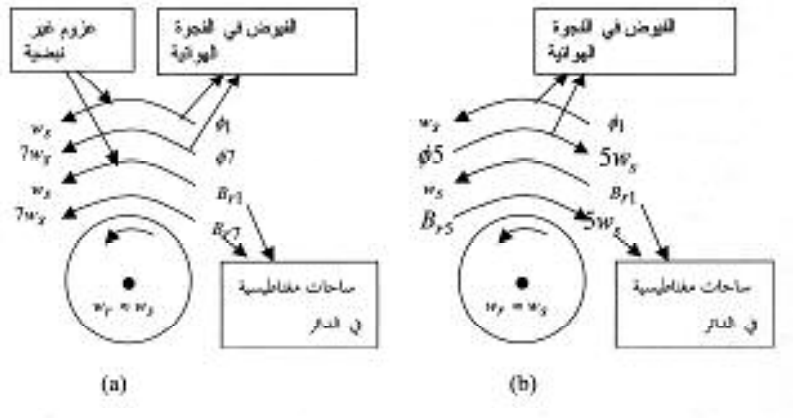
أما معادلة العزم في حالة التغذية غير الجيبية فإنها تتمثل بجميع التراكيب التي تحتوي على جداءات التيارات في الثابت والدائر أي:

$$T_{em} = \frac{3}{2} pM \left[\sum_{k,i=1}^{m} i^s_{\alpha ki} \cdot i^r_{\beta ik} - \sum_{k,i=1}^{m} i^s_{\beta ki} \cdot i^r_{\alpha ik} \right] \qquad (7)$$

حيث: $i^s_{\alpha ki}, i^r_{\beta ik}, i^s_{\beta ki}, i^r_{\alpha ik}$ التيارات في ملفات الثابت والدائر بالنسبة للمحاور α, β.

إن وجود التوافقيات في موجة الساحة المغناطيسية المتشكلة في الثابت يؤدي إلى حدوث عزوم نبضية [1] (مركبات نبضية في العزم) (Pulsating Torque) . وإذا

كانت هذه العزوم النبضية بترددات منخفضة فإنها تستطيع أن تسيء إلى أداء المحرك وتتعب المحور وتؤدي إلى تأرجحات في السرعة، كما تؤثر في زمن الحالة العابرة وفي تيارات الصدمة. وبالأخذ بالحسبان التوافقيات الخامسة والسابعة والتي هي أخفض التوافقيات، فإن تشكل العزوم النبضية يمكن تفسيرها بالنظر إلى تأثيرها سوية في موجة الساحة المغناطيسية، وذلك كما هو مبين في الشكل(8).



شكل (8)

ففي الشكل (a) تؤدي التوافقية السابعة إلى تشكل ساحة مغناطيسية في الفجوة الهوائية تدور بسرعة قدرها ($7w_S$) وباتجاه الساحة الدوارة الرئيسية والدائر نفسه. إذا فرضنا أن سرعة دوران الدائر قريبة من (w_S) فمن السهل عندئذ أن نرى أن ساحة الدائر تتكون من مركبة رئيسية (B_{r1}) لها سرعة (w_S) ومن المركبة السابعة (B_{r7}) التي لها سرعة ($7w_S$) كما في الشكل(a)، والساحات B_{r7}, ϕ_1 تدوران بالسرعة نفسها وتولدان عزماً غير نبضي.

الشيء نفسه صحيح بالنسبة لتقاطع (Intersection) الفيض (ϕ_7) في الفجوة الهوائية مع (B_{r7}) واللتان تدوران بالسرعة نفسها ولكن السرعة النسبية بين (ϕ_7) و

(B_{r1}) هي ($6w_S$) وبشكل مشابه السرعة النسبية بين ϕ_1 و B_{r7} هـي ($6w_S$) لذلك تنتج مركبات للعزم تهتز بتردد التوافقية السادسة.

أما في الشكل (b) فتدور التوافقية الخامسة في موجة الساحة المغناطيسية بسرعة تساوي ($5w_S$) وبعكس اتجاه الدائر، والفيوض المغناطيسية المتحرضة في الدائر مبينة في الشكل(b) حيث الفيض ϕ_5 يتقاطع مع (B_{r1}) والفيض ϕ_1 يتقاطع مع (B_{r5}) لتُنتجان مركبتين للعزم، كل منهما تهتز بتردد التوافقية السادسة أيضاً.

إن المناقشة السابقة تبين أن كلاً من التوافقية الخامسة والسابعة في موجة الساحة المغناطيسية تضافان إلى بعضهما بعضاً لتشكلا عزماً يهتز بتردد التوافقية السادسة.

يمكن إجراء الحسابات نفسها بالنسبة لتوافقيات أخرى، فطبعاً اهتزاز أو تموج العزم (أو العزم النبضي) يؤثر في سرعة الدائر ويُحدث فيها أيضاً اهتزازات أو تموجات.

في المعادلة (7) إن جداء التيارات التي لها الدلائل نفسها (k=i) تمثل العزوم الدورانية، أما جداءات التيارات بدلائل مختلفة (k≠i) فتشكل العزوم النبضية. فمن أجل موجة توتر تحتوي ثلاث توافقيات (الأولى، الثالثة، والخامسة مثلاً) تكون معادلة العزم الدوراني بالشكل الآتي:

$$T_{rot} = \frac{3}{2} pM\left(i^s_{\alpha 1} \cdot i^r_{\beta 1} - i^s_{\beta 1} \cdot i^r_{\alpha 1} + i^s_{\alpha 2} \cdot i^r_{\beta 2} - i^s_{\beta 2} \cdot i^r_{\alpha 2} + i^s_{\alpha 3} \cdot i^r_{\beta 3} - i^s_{\beta 3} \cdot i^r_{\alpha 3} \right) \qquad (8)$$

أما معادلة العزم النبضي:

$$T_{vib} = \frac{3}{2} pM \begin{bmatrix} (i^s_{\alpha 1} \cdot i^r_{\beta 2} - i^s_{\beta 1} \cdot i^r_{\alpha 2}) + (i^s_{\alpha 1} \cdot i^r_{\beta 3} - i^s_{\beta 1} \cdot i^r_{\alpha 3}) + (i^s_{\alpha 2} \cdot i^r_{\beta 1} - i^s_{\beta 2} \cdot i^r_{\alpha 1}) + (i^s_{\alpha 2} \cdot i^r_{\beta 3} - i^s_{\beta 2} \cdot i^r_{\alpha 3}) + \\ (i^s_{\alpha 3} \cdot i^r_{\beta 1} - i^s_{\beta 3} \cdot i^r_{\alpha 1}) + (i^s_{\alpha 3} \cdot i^r_{\beta 2} - i^s_{\beta 3} \cdot i^r_{\alpha 2}) \end{bmatrix} \qquad (9)$$

ومعادلة الحركة تعطى بالشكل التالي:

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{p}{J}\left(T_{em} - T_c\right) \qquad (10)$$

أما كيفية توزع وتبادل الاستطاعة الفعلية والردية في الحالات العابرة عند تغذية المحركات بتوترات غير جيبية فيمكن أيضاً إيجادها بحل جملة المعادلات التي تصف

عملية تحويل الطاقة. فجداء التيارات والتوترات للملفات الموجودة على المحور نفسه يمثل الاستطاعة الحقيقية التي يستجرها المحرك من الشبكة أي:

$$P_1(t) = \sum_{k,i=1}^{m} u^s_{\alpha k} \cdot i^s_{\alpha i} + \sum_{k,i=1}^{m} u^s_{\beta k} \cdot i^s_{\beta i} \qquad (11)$$

ومن أجل التوافقيات الثلاث الأولى والثالثة والخامسة تعطى علاقة الاستطاعة الحقيقية بالشكل الآتي:

$$P_1(t) = u^s_{\alpha 1} \cdot i^s_{\alpha 1} + u^s_{\beta 1} \cdot i^s_{\beta 1} + u^s_{\alpha 2} \cdot i^s_{\alpha 2} + u^s_{\beta 2} \cdot i^s_{\beta 2} + u^s_{\alpha 3} \cdot i^s_{\alpha 3} + u^s_{\beta 3} \cdot i^s_{\beta 3} \qquad (12)$$

أما الاستطاعة الردّية المستجرة فتساوي:

$$Q(t) = \sum_{k,i=1}^{m} u^s_{\alpha k} \cdot i^s_{\beta i i} - \sum_{k,i=1}^{m} u^s_{\beta k} \cdot i^s_{\alpha i} \qquad (13)$$

ومن أجل التوافقيات الثلاث السابقة:

$$Q(t) = u^s_{\alpha 1} \cdot i^s_{\beta 1} - u^s_{\beta 1} \cdot i^s_{\alpha 1} + u^s_{\alpha 2} \cdot i^s_{\beta 2} - u^s_{\beta 2} \cdot i^s_{\alpha 2} + u^s_{\alpha 3} \cdot i^s_{\beta 3} - u^s_{\beta 3} \cdot i^s_{\alpha 3} \qquad (14)$$

أما الاستطاعة الكلية **(الظاهرية)** فتحسب كما رأينا سابقاً من العلاقة: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ، ويعطى المردود كنسبة بين الاستطاعة الميكانيكية $P_2(t)$ على محور المحرك والاستطاعة الحقيقية المستجرة من الشبكة $P_1(t)$ أي: $\eta = \frac{P_2(t)}{P_1(t)}$

حيث : $P_2(t) = T \cdot \Omega_r$

وعامل الاستطاعة يعطى بالعلاقة الآتية: $\cos\varphi_1(t) = \frac{P_1(t)}{S(t)}$.

والشكل(9) يبين المخطط الصندوقي الذي يمثل النموذج الرياضي للمحرك المستخدم وذلك عند تغذيته بتوترات غير جيبية. **[7,8,9]**

وبعد النمذجة والتمثيل الرياضي للمحرك السابق حصلنا على المنحنيات المبينة في الأشكال المبينة أدناه.

حيث:

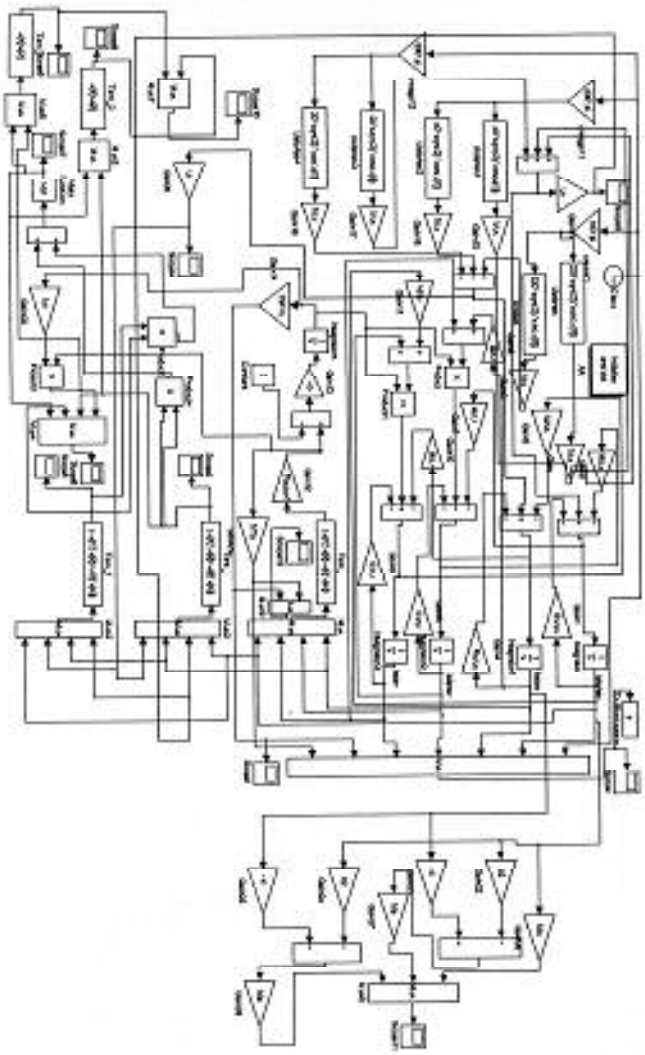
1- الشكلان (a-10) و (b-10) يمثلان منحنى (العزم–سرعة) خلال المرحلة العابرة في حالتي اللاحمل والتحميل وبوجود التوافقيات الثالثة والخامسة إلى جانب التوافقية الأساسية في موجة التوتر المغذي للمحرك.

2- والشكلان (a-11) و (b-11) يبينان منحنيات التيارات I_A ,I_B, I_C خلال المرحلة العابرة في حالتي اللاحمل والتحميل وعند التغذية غير الجيبية السابقة.

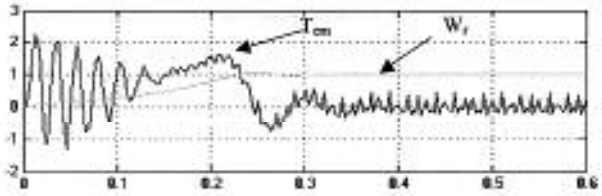
3- أما الشكلان (a-12) و (b-12) فيمثلان منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية والكلية المستجرة من الشبكة وكذلك الاستطاعة الميكانيكية المتولدة على محور المحرك وذلك في حالتي اللاحمل والتحميل وعند التغذية السابقة.

4- والشكلان (a-13) و (b-13) يبينان منحنيات المردود وعامل الاستطاعة الموافقتين للحالات المذكورة.

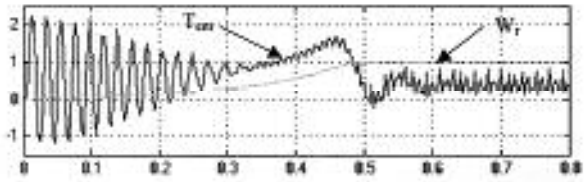
يلاحظ من الأشكال السابقة تشكل العزوم النبضية والاهتزازية في منحنى العزم بعد دخول المحرك في المرحلة المستقرة،هذه الاهتزازات التي تسيء إلى أداء المحرك وتتعب المحور وتؤدي إلى تأرجحات في السرعة. كذلك يلاحظ تأثير هذه العزوم النبضية في منحنيات الاستطاعة، حيث تزداد الاهتزازات في منحنياتها وتتعقد طبيعة تبادل الطاقة بين المنبع والمحرك وبين التوافقية الأساسية والتوافقيات العليا، وتؤثر ذلك بشكل جلي في منحنيات عامل الاستطاعة حيث تتعقد أيضاً شكل هذه الاهتزازات نتيجة العزوم النبضية. وقد تساعد منحنيات عامل الاستطاعة مع منحنيات المردود على تحليل ظاهرة تحويل الطاقة الكهربائية بشكل أدق وأعمق.



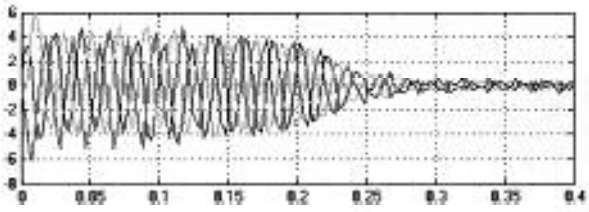
الشكل(9) المخطط الصندوقي لنموذج المحرك المستخدم عند التغذية غير الجيبية



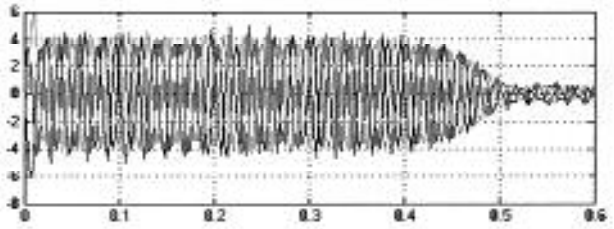
الشكل(10-a) منحنيات العزم و السرعة في حالة اللاحمل عند التغذية غير الجيبية



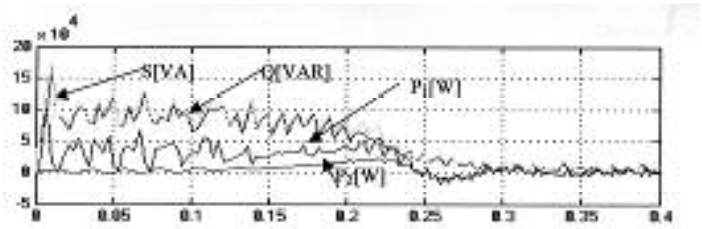
الشكل(10-b) منحنيات العزم و السرعة في حالة التحميل عند التغذية غيرالجيبية



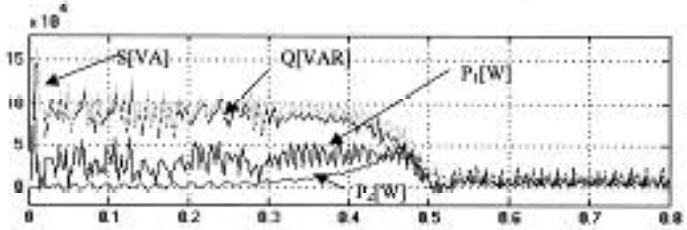
الشكل(11-a) منحنيات تيارات الأطوار الثلاثة في حالة اللاحمل عند التغذية غير الجيبية



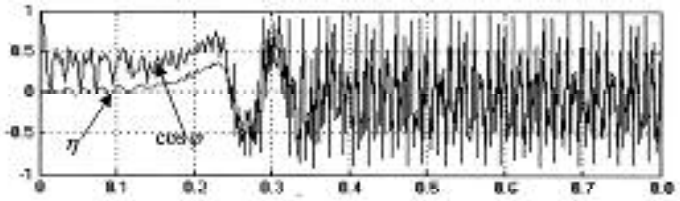
الشكل(11-b) منحنيات تيارات الأطوار الثلاثة في حالة التحميل عند التغذية غير الجيبية



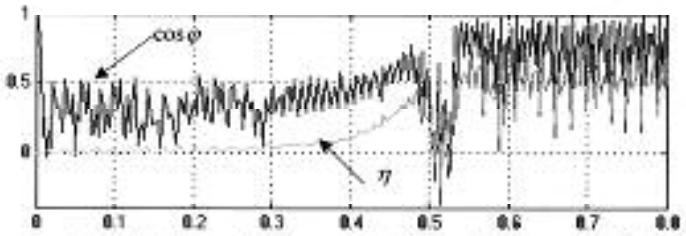
الشكل(a-12) منحنيات الاستطاعات في حالة اللاحمل عند التغذية غير الجيبية



الشكل(b-12) منحنيات الاستطاعات في حالة التحميل عند التغذية غير الجيبية



الشكل(a-13) منحنيات المردود وعامل الاستطاعة في حالة اللاحمل عند التغذية غير الجيبية



الشكل(b-13) منحنيات المردود وعامل الاستطاعة في حالة التحميل عند التغذية غير الجيبية

3- استنتاجات:

- وُضع نموذج رياضي للمحرك التحريضي بالاعتماد على النظرية العامة للآلات الكهربائية حيث تم وصف المحرك بمجموعة من المعادلات التفاضلية التي تأخذ بالحسبان شكل الساحة المغناطيسية في الفجوة الهوائية وتساعد على دراسة الخصائص والدلائل المختلفة لهذه المحركات كالعزم والسرعة والاستطاعة الفعلية والردية والمردود وعامل الاستطاعة، وذلك في الحالات العابرة وبعد الأخذ بالحسبان التوافقيات المختلفة المتشكلة في الساحة المغناطيسية نتيجة تغذية هذا المحرك بتوترات غير جيبية.

- إن وجود التوافقيات في موجة التوتر المغذي للمحرك يؤدي إلى زيادة في ظهور المركبات النبضية في العزم، و إذا كانت هذة العزوم النبضية لها ترددات منخفضة فإنها تستطيع أن تؤثر في المحور و تؤدي إلى تأرجحات في السرعة كما تؤثر أيضاً على زمن الحالة العابرة وفي تيارات الصدمة.

- إن خصائص التشغيل في حالة التغذية غير الجيبية تختلف عنها في حالة التغذية الجيبية، فالتوافقيات العليا للتوتر تسبب ضياعات إضافية ومن ثَمَّ نقصان المردود، وتتعقد طبيعة تبادل الطاقة بين المنبع والمحرك وبين التوافقية الأساسية والتوافقيات العليا وتزداد الاهتزازات في منحنى الاستطاعات وتتعقد شكل هذه الاهتزازات في منحني عامل الاستطاعة ويظهر ذلك بشكل واضح من مقارنة المنحنيات المميزة لكل حالة تشغيل.

- إن هذه الخصائص لها أهمية كبيرة خاصة عند تصميم واستثمار المحركات الكهربائية التي تعمل مع وجود دارات القيادة الإلكترونية، فهي تحدد كلفة وطريقة استخدام تنظيم سرعة هذه المحركات التي تعمل في مجالات تشغيل مختلفة.

- فمن معرفة الاستطاعة الفعلية والردّية وكذلك المردود وعامل الاستطاعة يمكن إيجاد مجالات الاستخدام المناسبة لهذه المحركات التي تعمل حيث يتطلب تنظيم

سرعتها، بحيث يمكن معها تحديد مسائل اقتصاد وتوفير الطاقة والتي تزداد أهمية نظراً لازدياد عدد المحركات التي تستخدم في المجالات التي تتطلب تنظيم في السرعة.

– عند المقارنة بين حالات تحويل الطاقة في الآلة التي تتغذى بتوترات جيبية وتوترات غير جيبية، يلاحظ أنة من أجل الحمولة نفسها على محور المحرك، فإن استجرار الاستطاعة الكهربائية في حالة التغذية غير الجيبية للتوتر أكبر، أما المردود فينقص وذلك نظراً لزيادة عدد التوافقيات ذات المرتبة العليا والتي تسبب ضياعات إضافية.

– إن التغذية غير الجيبية تؤثر تأثيراً كبيراً في الحالة المستقرة أكثر منها على الحالة العابرة، وذلك لأنه حتى في حالة التغذية الجيبية فإن التيارات تكون غير جيبية في الحالة العابرة.

– إن منحنيات المردود وعامل الاستطاعة في الحالات العابرة تساعد وبشكل أدق وأعمق على فهم عملية تبادل الطاقة.

المراجـــع

[1] Syed and Nasar, “Electric Machines and Power Systems, Mc Graw Hill publishing company, 1994, published in U.K., University of Kentucky U.S.A.

[2] “Principles of Electric Machines and power Electronics” , P.C.Sen Queens University Canada, John Wiley and Sons jan 1997, published in U.S.A

[3] – د.م فاتح رشيد بسو، "النظرية العامة للآلات الكهربائية"، جامعة حلب، 1997.

[4] N. MOHAN and R.J. FERRARO “ Techniques for Energy Conservation in AC motor Driven systems, EPRI, Final Report EM-2037, 1981.

[5] “Energy Conservation: Electric Motors and Generators”, Ramshaw , 1996 ,

[6] KOPILOV I. P. ”Mathematical Simulation of Electrical Machines”, Vishaya Shkola 1987 ,p.248

[7] MOKHTARI,” Engineering Applications of Matlab 5.3 and Simulink 3 “SPRINGER 2000.

[8] Chee-Mun Ong“ ، Dynamic Simulation of Electric Machines”, Using Matlab/ Simulink .Book , 1998

[9] Matlab ver. 6.5 ،Simulink ، " Dynamic System Simulation for Matlab " ،manual, Mathworks, Inc., 1990 -1999.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق2004/11/23.