فقد التحريض المغناطيسي فى المولدات التزامنية وأثره فى خروج الآلة عن الإستقرار

محمود حسين موسى
قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية
كلية الهندسة - جامعة الفاتح
ص.ب 13275 طرابلس

ABSTRACT

In this paper a new digital relaying algorithm is introduced for the protection of synchronous generators against loss of field conditions. The new algorithm is based on measuring the three-phase reactive power output of the machine, and monitoring the direction and magnitude of the reactive power at the machine terminals. The protection algorithm is designed such that it can provide a reliable protection against loss of field conditions and remains stable during recoverable power system swing conditions. While the new relay produces trip signal for partial loss of field conditions causing the machine to loose its stability, it remains stable for partial loss of field conditions which can be corrected via machine excitation and VAR systems.

الملخص

سيتم فى هذه الورقة عرض منظومة وقاية جديدة لحماية المولدات التزامنية عند تعرضها لفقد التحريض المغناطيسى. تعتمد هذه المنظومة فى عملها على متابعة القدرة غير الفعَّالة عند أطراف الآلة عن طريق تحديد إتجاه سريانها ومقداره ومن ثم يمكن الحكم على وضعية التحريض المغناطيسى بالمولد. صممت هذه المنظومة لتوفـــر حماية أكيدة للمولد عند فقد التحريض المغناطيسى مع التأكيد على بقاء تلك المنظومة مستقرة عند حدوث أعطاب إنتقالية شديدة أخرى داخل أو خارج المولد.

برهنت هذه المنظومة من خلال المحاكاة بالحاسوب على مقدرتها على إكتشاف الفقد النسبى لبعض ملفات التحريض المغناطيسى التى قد ينتج عنها خروج الآلة عن الإستقرار مع الشبكة وفى ذات الوقت بقيت هذه المنظومة مستقرة عند الفقد الجزئى لملفات التحريض المغناطيسى التى يمكن معالجتها دون أن تتسبب فى خروج الآلة عن الإستقرار.

الكلمات المفتاحية: فقد التحريض المغناطيسي ؛ القدرة الغير الفعَّالة ؛ فقد الاستقرار ؛ الألغوريثم ؛ تيار التحريض المغناطيسي ؛ المولدات المتزامنة

مقدمة عامة

تتعرض الآلة عند فقد التحريض المغناطيسى للمولدات الكهربائية العاملة والمتصلة بالشبكة العامة للعديد من التأثيرات من أهمها الزيادة فى السرعة الدورانية للعضو الدوار عن السرعة التزامنية حيث تتحول الآلة إلى مولد حثى يستمد قدرته غير الفعَّالة من الشبكة العامة. ينتج عن هذه الوضعية أثار كبيرة على الآلة وعلى الشبكـــة منها [2-6]:

1- زيادة كبيرة فى تيارات التحميل بعضو الإنتاج بالمولد.

2- تولد تيارات حثية على السطح الخارجى للعضو الدوار عند التردد الإنزلاقى مما ينتج عنها إرتفاع شديد فى درجة حرارة العضوء الدوار.

3- هبوط شديد فى جهد خطوط النقل الناتجة عن سريان الزيادة فى القدرة غير الفعالـــة المسحوبة بالآلة مما قد ينتج عنه خروج تلك الخطوط من الشبكة.

لهذه الأسباب فإن فقد التحريض المغناطيسى كليا أو جزئيا بالمولدات التزامنية لابدّ من إكتشافه مبكرا والعمل السريع على تصحيحه أو إخراج الآلة عن الشبكة بالسرعة المناسبة وذلك لحماية الآلة أولا والشبكة المتصلة بها ثانيا.

المؤشر الاولي لاحتمال فقد التحريض المغناطيسى بالآلات المتزامنة هو التزايد الملحوظ فى القدرة غير الفعالـــة المسحوبة من الشبكة للتعويض عن فقد التحريض المغناطيسى. هذه الحالة يمكن إكتشافها بإستخدام الحماية المسافية [2-3]، حيث عند فقد التحريض المغناطيسى تقع المعاوقة المقاسة عند أطراف الآلة داخل خواص التشغيل للمرحّل المسافى. ولكن من أهم عيوب المرحّل المسافى هو البطء الشديد فى إكتشاف الفقد الجزئى لملفات التحريض المغناطيسى وكذلك تأثره بالأعطاب الخارجية الشديدة التى قد ينتج عنها فصل المولد عن الشبكة خطأ[2, 6].

تم في هذه الورقة تقديم منظومة رقمية جديدة لحماية المولدات الكهربائية عند تعرضها لفقد التحريض المغناطيسى جزئياً أو كاملاً، إعتمادا على قياس مقدار وإتجاه القدرة غير الفعالـــة عند أطراف المولد. لقد برهنت هذه المنظومة الجديدة على فعاليتها الشديدة فى إكتشاف فقد التحريض المغناطيسى بالسرعة المناسبة قبل وصول الآلة إلى مراحل الخروج عن الإستقرار، وكذلك برهنت هذه المنظومة على قدرتها على البقاء مستقرة عند الأعطاب الإنتقالية الشديدة الآخرى داخل أو خارج الآلة.

القدرة غير الفعَّالة بالمولد

يمكن حساب القدرة غير الفعالة الخارجة عند أطراف المولد Q_t من المعادلة [10,11]:

$$Q_t = 3\left[\frac{E_q.V_t}{X_d}\cos\delta - \frac{V_t^2}{X_d}\right] = Q_F + Q_N \qquad (1)$$

ونلاحظ من هذه المعادلة أن القدرة غير الفعَّالة تتكون من مركبتين:

- المركبة Q_F وهى تمثل القدرة غير الفعالة المنتجة داخليا بالمولد بواسطة التحريض المغناطيسى، وتعتمد على الجهد الداخلى E_q وزاوية التحميل δ.
- المركبة Q_N وهى تمثل القدرة غير الفعالة المسحوبة من الشبكة العامة، وتعتمد على الجهد عند أطراف المولد.

من هذه المعادلة يمكن ملاحظة الآتى:

عندما $Q_F > Q_N$ حيث يقوم المولد بإنتاج قدرة غير فعالة زائدة عن حاجته، يتم حقنها بالشبكة. في هذه الحالة يكون المولد ذو تحريض متزايد وله معامل قدرة لاحق وتعتمد حدود تشغيله على مقدار تيار التحريض المسموح به.

- عندما $Q_F = Q_N$ تكون القدرة غير الفعالة المولدة داخليا مساوية تماما للقدرة غير الفعالة الممتصة من الشبكة, وفى هذه الحالة يكون معامل قدرة المولد مساوى للوحدة.
- عندما $Q_F < Q_N$ يكون المولد ذو تحريض متناقص ويتم سحب إحتياجاته من القدرة غير الفعالة من الشبكة العامة.
- عند توصيل مولد كهربائى بالشبكة العامة فإن معادلة النهايات التحميلية للمولد معطاة بالمعادلة (10):

$$P_t^2 + \left[Q_t - \frac{V_t^2}{2}\left(\frac{1}{X_s} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2 = \left[\frac{V_t^2}{2}\left(\frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_d}\right)\right]^2 \qquad (2)$$

وهى معادلة دائرة فى مستوى (P,Q) وتقطع محور القدرة غير الفعالة Q عند نقطتان تمثلان نهايتا التحميل بالقدرة غير الفعَّالة. والقدرة غير الفعَّالة القصوى المسحوبة من الشبكة Q_{max} عند معامل قدرة متقدم مساوى للصفر هى:

$$Q_{\max} = -\frac{3V_t^2}{x_d} \qquad (3)$$

وفى واقع الأمر فإن المولد لا يمكن تشغيله عند هذه النقطة، حيث تمثل نقطة عدم استقرار {δ= -90°}، ويكون عندها المولد قد فقد إستقراره فعليا مع الشبكـــة. وبذلك فإن أقصى قدرة يمكن أخذها كمستوى لقياس فقد الإستقرار تقع فى حدود {Q_{max} (0.6-0.8)}. وبذلك فإن القدرة غير الفعالـــة التى يحدث عندها فقد التحريض S {القدرة التى يقوم عندها هذا المرحل الرقمي بإصدار الأمر بفصل المولد عن الشبكـــة (مستوى اللقط)} هـــى:

$$S = 0.8\ Q_{max} \tag{4}$$

الألغوريثم

عند تعرض ملفات المجال المغناطيسى لأعطاب كحدوث دائرة قصر أو حدوث إنقطـــاع لتيار التحريض المغناطيسى، فإن تيار التحريض يبدأ فى التناقص التدريجي إلى أن يهبط للصفر بعد فترة زمنية معينة. وخلال تلك الفترة تتناقص القدرة غير الفعالة Q_F المولدة داخليـــاً بـــنفس الأسلوب ويتم التعويض عن ذلك التناقص بسحب قدرة غير فعالـــة من الشبكة العامة. ويلاحظ خلال هذه الفترة أن القدرة غير الفعالة الكلية Q_t تبدأ بالتناقص التدريجى مرورا بالـــصفر ثـــم ينعكس إتجاهها ويبدأ المولد بسحب كافـــة حاجته من القدرة غير الفعالة من الشبكة العامـــة إلى اللحظة التى تفقد فيها الآلة الإستقرار ويتم إخراجها من الشبكة. من خلال المقدمة السابقة يمكن وضع خطوات عمل منظومة الحماية الجديدة {الألغوريثم} كالتالى:

- حساب القدرة غير الفعالـــة اللحظية $Q(n)$ بأخذ عينات لتيارات وجهود الأطـــوار عنـــد أطراف الآلة والتعويض بالمعادلة [13,14]:

$$Q(n) = \frac{1}{\sqrt{3}}\left[v_a(n)(i_b(n) - i_c(n)) + v_b(n)(i_c(n) - i_a(n)) + v_c(n)(i_a(n) - i_b(n))\right] \tag{5}$$

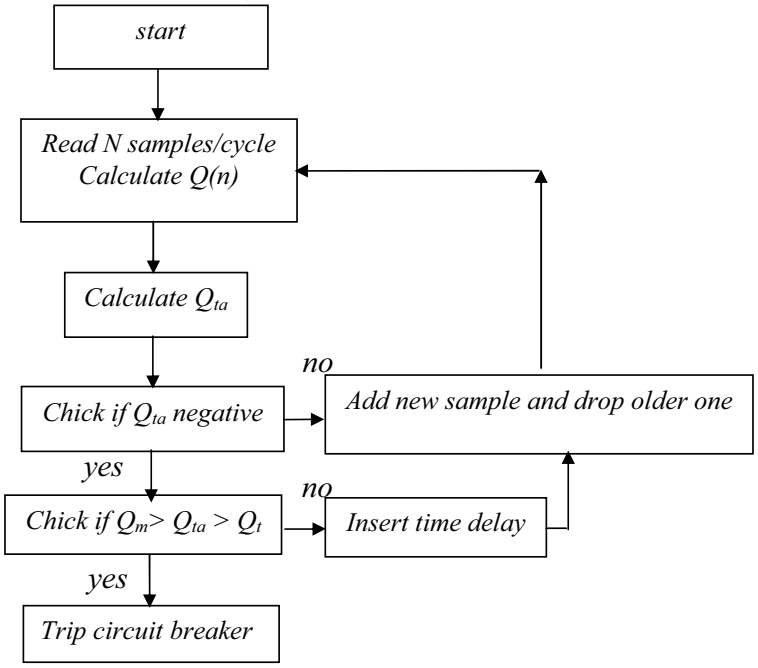
- حساب القدرة غير الفعالـــةالمتوسطـــة Q_t بإستخدام نافذة ذات عدد N من العينات والتعويض بالمعادلة [14]:

$$Q_t = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} Q(n) \tag{6}$$

حيث عن طريق إستخدام هذه النافذة يتم التخلص من التشويش الناتج عن الترددات العالية الناتجة خلال الأعطاب.

يقوم الألغوريثم على الدوام بمتابعة إتجاه سريان القدرة غير الفعالة Q_t ومقارنتها بمقياس القطع S وعند تجاوز هذا الحد يقوم الألغوريثم بإصدار أمر القطع الفورى للقاطع الخاص بالمولد. كذلك يقوم الألغوريثم بمقارنة Q_t بالقدرة غير الفعالة Q_m المقابلة لمعامل قدرة 0.95

متقدم. وعند وقوع هذه القدرة ضمن المتباينة $\{Q_m > Q_t > S\}$ يقوم الألغوريثم بإدخال تأخير زمنى مناسب وإصدار إشارة تنبيه للمشغل بالتدخل لإصلاح الوضع وإلاّ تم فصل المولد عن المنظومة. التأخير الزمنـــى هذا يكون من النوع *adaptive time delay* ويتناسب مقداره عكسياً مع نسبة فقد ملفات التحرض, حيث يزداد هذا التأخير الزمني كلما كانت نسبة الملفات المفقودة صغيرة ويتناقص فى الحالة المغايرة. ويصل هذا التأخير حده الأدنى عند الفقد الكلى للتحريض المغناطيسى وبما لايقل عن زمن 5 دبدبات من جهد الآلة المراد حمايتها للسماح للحالات العابرة بالتلاشى. ويمكن متابعـــة خطوات عمل هذا الألغوريثم من المخطط الإنسيابى التالى:

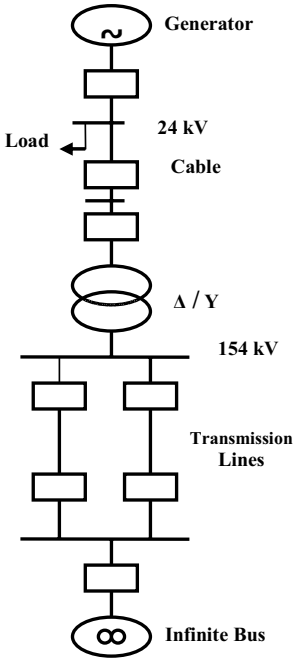


المخطط الانسيابى للألغوريتم المستخدم

المحاكاة بالحاسوب

لقد تم إجراء العديد من الدراسات بإستخدام الشبكة المبينة بشكل (1) للتأكد مـــن فعاليـــة الألغوريثم فى توفير الوقاية المناسبة للمولد عند تعرضه للفقد الكلى أو الجزئى لتيار التحـــريض المغناطيسى وكذلك للتأكد من إستقرارية الألغوريثم عند حدوث الأعطاب العابرة الآخرى خارج أو داخل المولد. وقد بينت كافة الدراسات التى أجريت على دقة وسرعة هذا النظام فى التمييـــز بين أعطاب دائرة المجال المغناطيسى والأعطاب الطارئة الآخرى. وفى جميع الحالات التى تم

التعرّض لها أمكن لهذا الألغوريثم إكتشاف حدوث العطب بدائرة المجال قبل خروج الآلة عن الإستقرار بالمنظومة، مما يعطي فرصة لعزل الآلة قبل تأثر باقى المنظومة بها. ويمكن ملاحظة ذلك بالرجوع الى المنحنيات المبينة بالاشكال من (2) إلى (6):



الشكل 1: الشبكة الكهربائية المستخدمة لدراسة فقد التحريض المغناطيسى

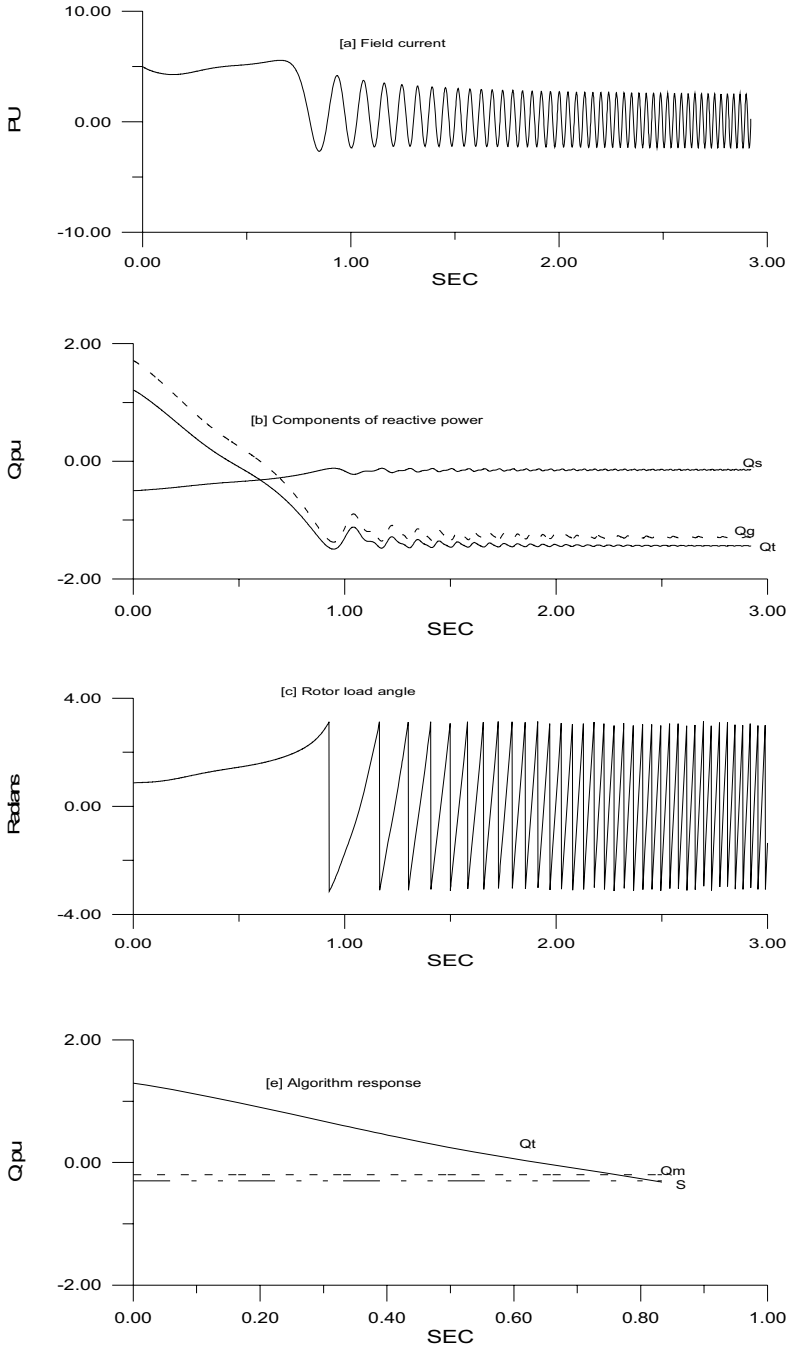
توضح المنحنيات المبينة بشكل (2) استجابة الألغوريثم عند فقد تيار التحريض المغناطيسى للمولد وهو محمل بالحمل الكامل عند معامل قدرة 0.8 لاحق. ونلاحظ من خلال هذه المنحنيات أن تيار المجال للمولد يبدأ بالتناقص التدريجى بينما تزداد سرعة دوران المولد عن السرعة التزامنية وبعد زمن 0.816 ثانية يصدر الألغوريثم أمره بإخراج المولد عن الشبكة. ونلاحظ أن زمن إكتشاف فقد التحريض حدث قبل دخول الآلة مراحل فقد الإستقرار بزمن كافى. كذلك فى المنحنيات المبينة بالاشكال (3-4) يمكن ملاحظة إستجابة الألغوريثم لحالات آخرى من فقد التحريض المغناطيسى.

عند حدوث فقد جزئى لملفات المجال المغناطيسى كما هو مبين بالشكل (5) فـنلاحظ أن منظم الجهد *(AVR)* يحاول التعويض عن هذا النقص بزيادة تيار المجال بالمولد. ولكن حيث أن نسبة كبيرة من ملفات المجال تم فقدها فإن الألغوريثم يصدر أمرا بفصل المولد بعد مرور زمن 1.65 ثانية وذلك للحفاظ على المولد ولحماية باقى المنظومة. ونلاحظ كذلك أن زمن إكتـشاف الفقد الجزئى للتحريض حدث قبل دخول الآلة مراحل فقد الإستقرار بزمن كافى.

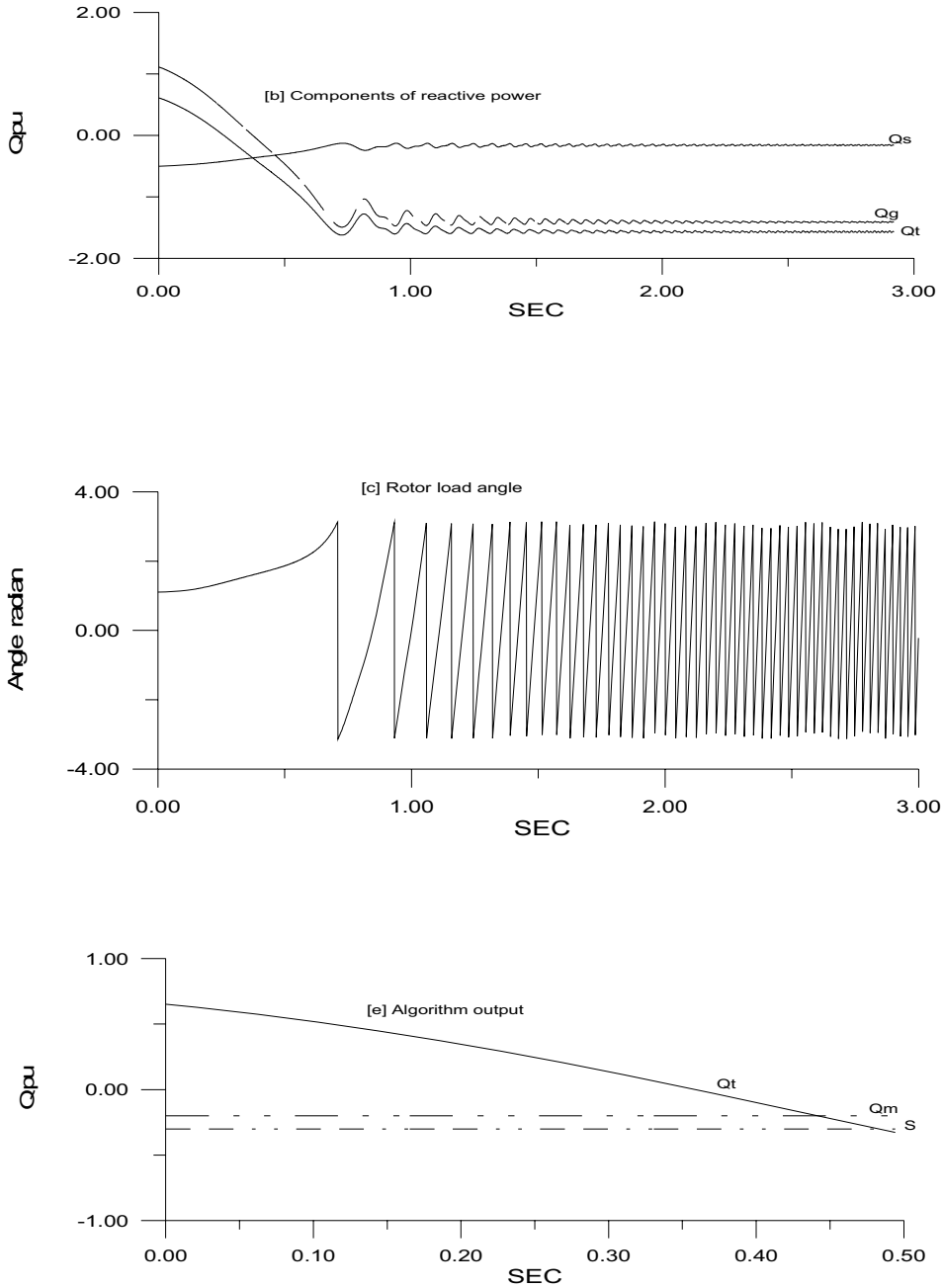
بينما نلاحظ في المنحنيات المبينة بشكل (6) إستجابة هذا الألغوريثم لأعطـاب خارجيـة شديدة تشمل عطبا ثلاثى الأطوار على أطراف المولد، مع إعادة قفل على نفس العطب. ونلاحظ أن القدرة غير الفعالـة ظلت موجبة ولم تتعدى حدود القطع S وظل الألغوريثم مستقرا ولم يتأثر بهذه الوضعية الشديدة وترك معالجتها لأجهزة الحماية الآخرى بعكس المرحّل المسافى الذى لم يستطع الصمود عند هذا النوع من الأعطاب الشديدة وكثيراً ما يقوم بفصل المولد خطأً.

الإستنتاج:

لقد تم فى هذه الورقة إدخال نظام جديد لتوفير الحماية للمولدات التزامنية عند تعرّضـها لفقد التحريض المغناطيسى يعتمد على المتابعة اللحظية لمقدار وإتجاه القـدرة غيـر الفعالـة بالمولـد عـن طريـق إسـتغلال الإمكانيـات الهائلـة التـى توفرهـا المعالجـات الدقيقـة (*microprocessors*) فى المتابعة اللحظية للوضع التشغيلى للمولد التزامنى. وقد تبين من خلال المحاكاة بالحاسوب أن هذه الطريقة أتبثت فعالية كبيرة فى إكتشاف أعطـاب دائـرة المجـال المغناطيسى للمولد خلال وقت قصير وقبل أن تفقد الآلة إستقرارها مع الشبكة. كما أتبتت هذه الطريقة فعاليتها فى إكتشاف الفقد الجزئى لبعض ملفات التحريض المغناطيسى ومعالجة كل حالة على حدة. كذلك اتبتت هذه الطريقة مقدرتها على البقاء مستقرة خلال تعرّض المولد للأعطاب الطارئة والشديدة داخليا أو خارجيا الأمر الذى يعطى هذه الطريقة تميزا على الطريقة التقليديـة المعتمدة على إستخدام المرحلات المسافية والتى لم تستطع الصمود أمام هذه الأعطـاب.كـذلك يمكن دمج هذه الطريقة فى منظومة حماية رقميـة متكاملة للمولد خاصة وإنها تعتمد فى عملها على بيانات يمكن أن تشترك فيها مع أنظمة الحماية الآخرى.

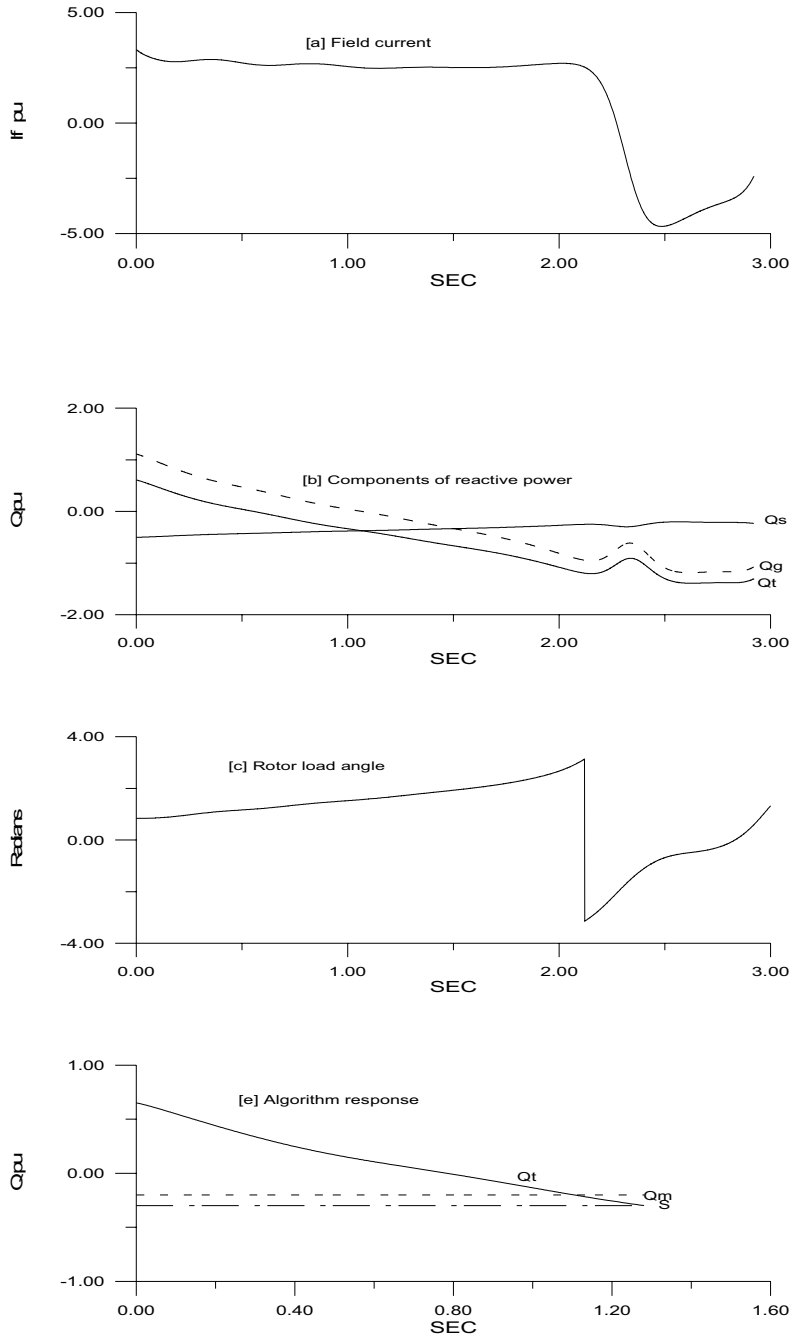


الشكل 2: إستجابة الالغوريتم لفقد التحريض المغناطيسى لمولد كهربائى عند الحمل الكامل ومعامل قدرة 0.8 متأخر (القطع خلال 0.816 ثانية) لاحظ أن PU تعنى النسبة للوحدة.

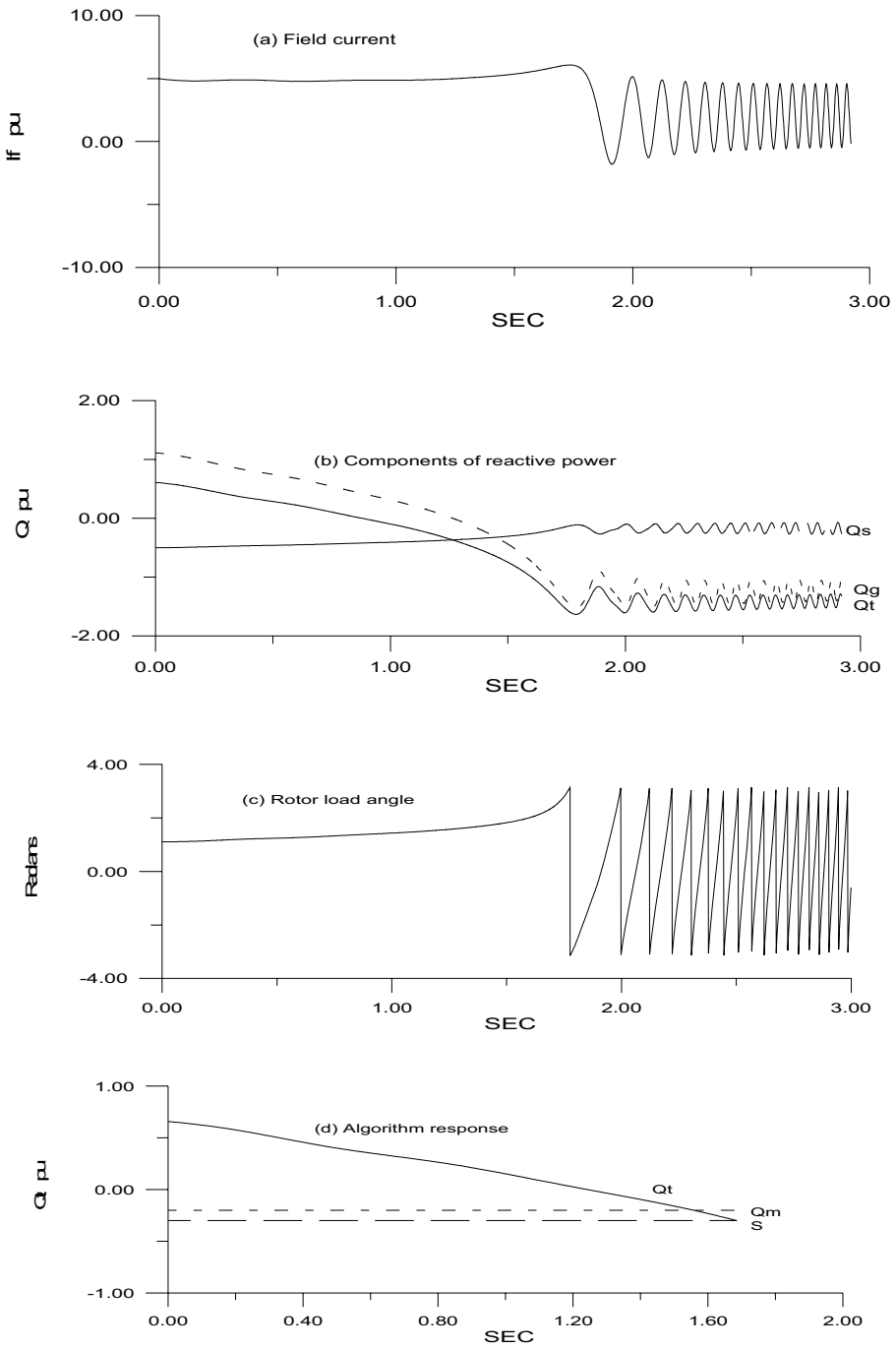


Algorithm response [trip in 0.46 sec]

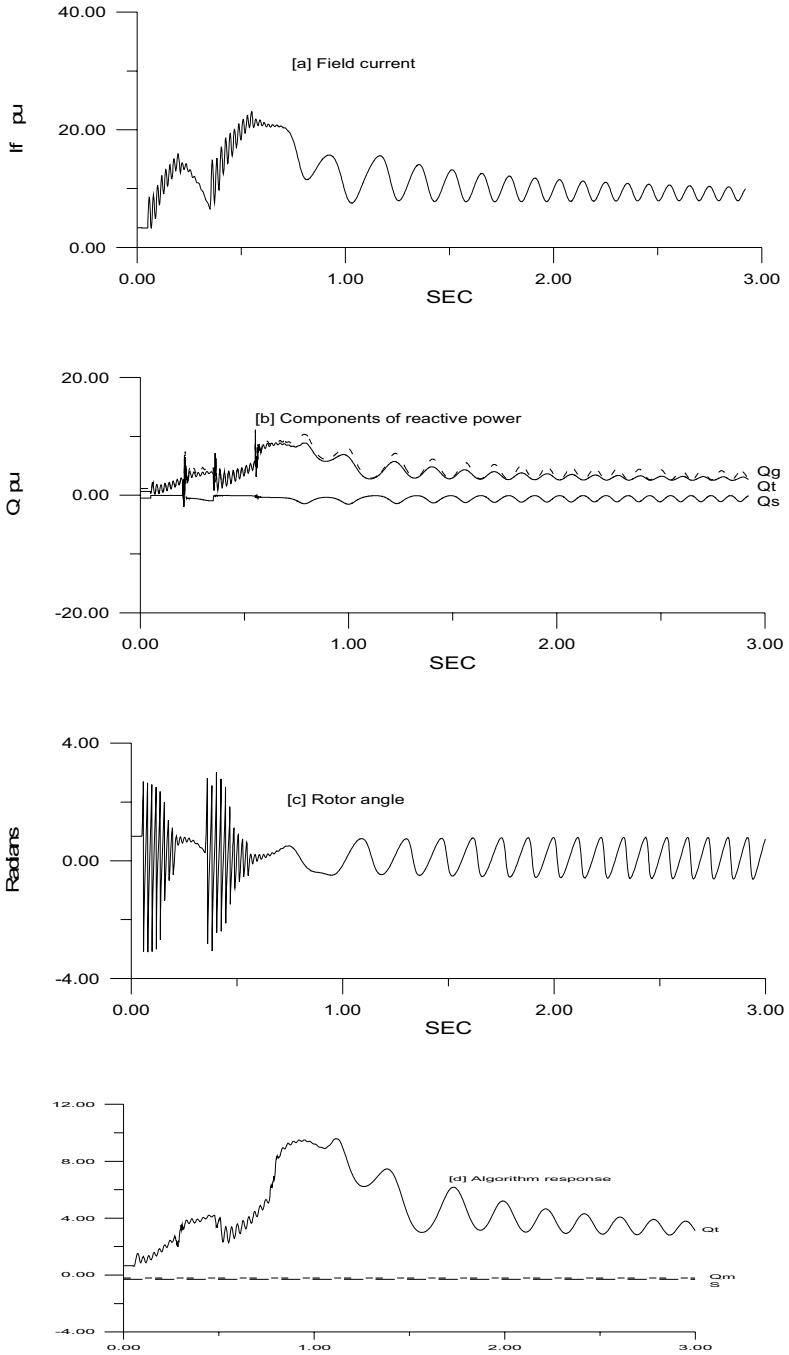
الشكل 3: إستجابة الالغوريتم لفقد التحريض المغناطيسى لمولد كهربائى عند الحمل الكامل ومعامل قدرة مساوى للوحدة (القطع خلال 0.46 ثانية).



الشكل 4: إستجابة الالغوريتم لفقد التحريض المغناطيسى لمولد كهربائى بدون حمل (القطع خلال 1.281 ثانية).



الشكل 5: إستجابة الالغوريتم لفقد جزئى لملفات التحريض المغناطيسى بواقع 50% لمولد كهربائى عند الحمل الكامل ومعامل قدرة مساوى للوحدة (القطع خلال 1.65 ثانية).



الشكل 6: إستجابة الالغوريتم لإعادة القفل على عطب ثلاثى الاطوار لمولد كهربائى عند الحمل الكامل

REFERENCES

[1] "IEEE Guide for AC Generator Protection," Trans. Power Delivery, vol.pp.957-964, April 1989.

[2] John Berdy, "Loss of excitation protection for modern synchronous generators", IEEE Trans. On PA&S, Vol.PAS-94, No.5, Sep/Oct, 1975.

[3] C.R.Mason, "A new loss of excitation relay for synchronous generators", AIEE Trans., Vol.68, 1949.

[4] D.C.Lee, P.Kundur, and R.D.Brown, "A high speed discriminating generator loss of excitation protection", IEEE Trans. on PA&S, Vol.98, 1979.

[5] R.L.Tremaine, and J.L.Blackburn, "Loss of field protection for synchronous machines", AIEE Trans. on PA&S, Vol. PAS -73, Part III, August 1954.

[6] Charles R.Arnolt and McClennon Rogers, "A study of loss of excitation relaying and stability of a 595 MVA generator on the Detroit Edison System", IEEE Trans. on PA&S, Vol.PAS-94, No.5, Sept./Oct. 1975.

[7] IEEE Working Group Report, ''Loss of field Relay Operation During System Disturbances'', IEEE Trans. On PAS -94, no.5, pp.1464-1472

[8] B.O. Powell, J.W.Skooglund, and C.L.Wanger, "Performance of excitation systems under abnormal conditions", IEEE Trans. on PA&S, Vol. PAS-87, No.2, February 1968.

[9] H.G.Darron, J.L.Koepfinger, J.R.Mather, and P.A.Rusch, "The influence of generator loss of excitation on bulk power system stability", IEEE Trans. on PA&S, Vol.PAS-96, No.5, Sept./Oct. 1975.

[10] P.Kundur, "Power System Stability & Control, Vol. I", McGraw Hill Inc., 1993.

[11] A. E. Fitzgerald, ''Electric Machinery'', McGraw-Hill Inc. 1992

[12] IEEE Committee Report,'' Survey of Experience with Generator Protection and Prospects for Improvements Using Digital Computer'', IEEE Trans.on PWRD, Vol. 3, No. 4, Oct. 1988.

[13] M.A.Redfern, and M.J.Checksfield, "A new pole slipping protection algorithm for dispersed storage and generators using equal area criterion", IEEE Trans. on PD , Vol.10, No.1, January 1995.

[14] O.Usta, M.Bayrak and MA Redfern," A new digital relay for generator protection against asymmetrical faults", IEEE Trans. on PD , Vol.17, No.1, January 2002.

[15] M H.Musa, "Fast detection of loss of field current of a generator", The 5th International Conference on Computational Aspects and Their applications CATAEE 2004, 16-18 March 2004, Philadelphia University- Jordan.

Appendix- A: Network data

1- **Generator parameters**:

Rating	400.0	MVA
Rated voltage	24	kV
Rated field current	1050	A
Number of poles	2	
Moment of inertia	0.95	M.Pound.Feet^2
Armature resistance	0.00312	pu
Armature leakage reactance	0.15	pu
d-axis reactance	1.27	pu
d-axis transient reactance	0.245	pu
d-axis sub-transient reactance	0.2	pu

q-axis reactance	1.2	pu
q-axis transient reactance	0.245	pu
q-axis sub-transient reactance	0.2	pu
d-axis open circuit time constant	4.6	sec
d-axis sub-transient time constant	0.03	sec
q-axis open circuit time constant	0.66 sec	
q-axis sub-transient time constant	0.06	sec

2- **Transmission line**:

Series impedance	1.33 + j 13.8	Ohms/ph

3- **Transformer**:

Rated voltage	24/154	kV

4- **Cable**:

Series impedance	0.04 + j 4.0	Ohms/ph