



ISSN: 1813-162X (Print) ; 2312-7589 (Online)

Tikrit Journal of Engineering Sciences

available online at: <http://www.tj-es.com>
TJES
 Tikrit Journal of
 Engineering Sciences

Yasir Mohammed Youns *

Omer Mohammad Hassan

Tikrit Journal of Engineering Sciences

Performances Analysis of SPWM Inverter-Fed Three Phase Induction Motor during Fault Conditions

ABSTRACT

Electrical Engineering Department
 College of Engineering
 University of Mosul
 Mosul
 Iraq

Induction motors are the most widely used electrical machines and the most popularly in the industrial applications, aerospace, and electrical vehicles or hybrid electrical vehicles. This celebrity of these machines because of some of their benefits such as: relatively low manufacturing cost, robust construction, moderate power factor, ability to operate in hostile environments, good reliability, and ease of control especially in the recent years. In fact, induction motors are the main component of many of these applications and they are used in the most of these applications with their power electronic drivers in order to control their speeds, torques, or control their starting conditions. However, these motors and their drivers may encounter several faults due to operating conditions. In fact, these faults are either due to the motor itself or due to its power electronic driver circuit. Therefore, this paper presents the performance analysis and simulation of a Sinusoidal pulse width Modulation (SPWM) inverter-fed three-phase induction motor under some fault conditions. Two different types of faults are studied and analyzed in detail. These faults were: driver single switch short circuit fault, and driver single switch open circuit fault. The motor currents and voltages at pre-fault and post-fault conditions are presented and investigated. In the two fault cases, the motor phase currents are changed and increased, but in different ratios, under same load conditions. Also, decreasing and oscillating in both motor speed and its developed torque are occurred due to these faults. The simulation and analysis results show that the single switch short circuit fault has the sever effect on the motor performance, therefore especial care should be taken under this fault conditions.

Keywords:

Drive
 induction motor
 fault
 switches

ARTICLE INFO

Article history:

Received 03 February 2017
 Accepted 15 July 2017
 Available online 01 December 2017

© 2017 TJES, College of Engineering, Tikrit University

DOI: <http://dx.doi.org/10.25130/tjes.24.4.11>

تحليل اداء المحرك الحثي ثلاثي الطور المغذى من مغير (تضمين عرض النبضة الجيبي) اثناء وقوع العطل

الخلاصة

يُعد المحرك الحثي ثلاثي الطور من أكثر المحركات الكهربائية المستخدمة في التطبيقات الصناعية والنوعية والسيارات الكهربائية والهجينة والامكن الملوثة لما له من مواصفات جيدة تميزه عن باقي انواع المحركات الكهربائية. وغالبا ما يُستخدم هذا المحرك مع دوائر الكترنيات القدرة التي تعمل كمسوق للتحكم بالمحرك الحثي ثلاثي الطور من حيث السرعة والعزم وغيرها. وبالرغم من جودته العالية ووثوقيته الا انه يتعرض الى اعطاب مختلفة سواء أكان العطب في المسوق او المحرك وكل من هذه الاعطاب يؤثر سلبا على اداء المحرك الحثي ثلاثي الطور ويختلف هذا التأثير من عطب الى اخر حيث بعض انواع الاعطاب يؤدي الى تلف المحرك بالكامل. ولذا استوجب الامر دراسة تأثير هذه الاعطاب على اداء المحرك. وفي هذا البحث تمت دراسة وتحليل وتمثيل تأثير عطين من اعطاب مسوق المحرك الحثي ثلاثي الطور على اداء وتصرف المحرك وتم تحليلهما رياضيا وتمثيلهما باستخدام الحاسبة. وهذه الاعطاب، عطب دائرة قصر في أحد مفاتيح المسوق (switch short circuit) وعطب فتح في أحد مفاتيح المسوق (switch open circuit) وهما من اعطاب دائرة المسوق. وقد اظهر البحث من خلال التحليل والتمثيل للمحرك مع مسوقه ان جميع هذه الاعطاب تؤدي الى زيادة تيارات اطوار المحرك وبالتالي ارتفاع درجة حرارة المحرك. كذلك تؤدي الى حصول تذبذب في سرعة المحرك وعزمه المتولد مما يسبب في اهتزاز جسم الماكينة. وقد كانت من أكثر العطين التي تمت دراستهما تأثيراً على المحرك الحثي ثلاثي الطور واداءه هو عطب قصر في احد مفاتيح المسوق. وذلك بسبب ظهور مركبة تيار مستمر عالي القيمة تعمل على كبح المحرك مع وجود فولتية التجهيز. ويتطلب الامر تدخلاً سريعاً لإخراج المحرك عن العمل والاتلف هذا العطب المحرك بالكامل.

* Corresponding author: E-mail : yasir_752000@yahoo.com

الدائرة المكافئة للمحرك على النظرة التي ينظر بها الباحث الى المحرك الحثي ثلاثي الطور حيث يعتبر بعضهم المحرك كحمولة مع ادخال الانزلاق (slip) الذي يميز المحرك الدوار عن المحولة الساكنة. والبعض الاخر يعتبر المحرك كدائرة كهربائية اعتيادية مع مصدر فولتية عكسية (back emf). في هذا التحليل سنعمد على الدائرة المكافئة التي تعبر عن المحرك الحثي بدائرة كهربائية اعتيادية، حيث

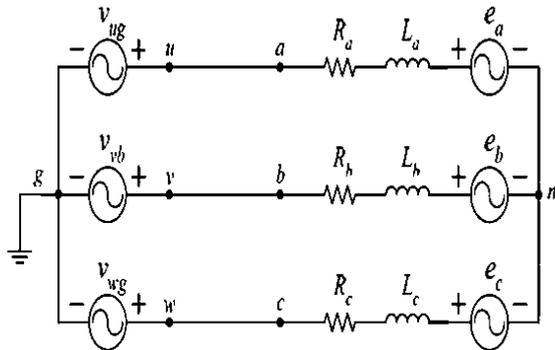
الجدول 1

الاعطاب التي يتعرض المحرك الحثي ثلاثي الطور ومسوقه ونسب وقوعها [3،1].

النسبة المئوية للنعيب %	نوع العطب	موقع العطب
38 أو أكثر	اعطاب الجزء الساكن	
يصل الى 50		
10 أو أقل	اعطاب الجزء الدوار	اعطاب تقع في المحرك الحثي ثلاثي الطور
يصل الى 1	اعطاب ميكانيكية	
40	انواع اخرى	
12	اعطاب مفاتيح مغير القدرة	
38		
53	اعطاب دائرة السيطرة	اعطاب تقع في المسوق
9	اسباب اخرى	

يمكن ان تعبر عن دوائر الاطوار الثلاثة للمحرك مجتمعة وان تتعامل مع جميع حالات التشغيل سواء أكان المحرك متمثلاً او غير متمثلاً وسواءً أكان المصدر متوازناً او غير متوازن. ويكون التمثيل في هذه الدائرة أقرب الى الواقع، وبهذا يمكن دراسة أي نوع من الاعطاب. في حين ان الدائرة المكافئة الاولى الشبيهة بالدائرة المكافئة للمحولة مع اضافة الانزلاق تكون الدائرة المكافئة لطور واحد من اطوار المحرك مقترضا بذلك ان المحرك متمثل والمصدر متوازن، اما اذا كان المحرك غير متمثل او المصدر غير متوازن فنصبح المسألة معقدة ويجب حساب المركبات المتماثلة عند كل حالة والتعامل مع دوائر كهربائية مكافئة مختلفة. ويبين الشكل 1 الدائرة الكهربائية المكافئة للمحرك الحثي ثلاثي الطور في الحالة المستقرة. حيث تمثل الاطراف (a,b,c) أطراف المحرك في حين تمثل الاطراف (u,v,w) أطراف المصدر ثلاثي الطور المجزأ للمحرك الحثي ثلاثي الطور ففي حالة التشغيل الطبيعي للمحرك تكون كل الاطوار مربوطة والمصدر متوازن فتكون:

$$\left. \begin{aligned} V_{ag} &= V_{ug} \\ V_{bg} &= V_{vg} \\ V_{cg} &= V_{wg} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



الشكل 1. الدائرة الكهربائية المكافئة للمحرك الحثي ثلاثي الطور قبل وقوع العطب.

الرموز	
V_{ag}, V_{bg}, V_{cg}	فولتيات اطراف المحرك الحثي ثلاثي نسبة الى الارضي على التوالي
V_{ug}, V_{vg}, V_{wg}	فولتيات المصدر ثلاثي الطور نسبة الى الارضي على التوالي
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	فولتيات اطراف المحرك الحثي ثلاثي نسبة الى نقطة التعادل على التوالي
V_{ng}	الفولتية عبر نقطة التعادل للمحرك الى الارضي
emf (ec)	القوى الدافعة الكهربائية المتولدة في المحرك الحثي ثلاثي الطور
SPWM	تضمين عرض النبضة الجيبي
k	ثابت يعتمد على السرعة المطلوبة للمحرك
R_s	مقاومة الجزء الساكن بـ (Ω)
I_a, I_b, I_c	تيارات الاطوار الثلاثة للمحرك

1. المقدمة

تستخدم المحركات الحثية ثلاثية الطور في التطبيقات الصناعية المختلفة بكثرة، وذلك لما لها من مواصفات وخصائص جيدة تمتاز بها عن غيرها من المحركات الكهربائية الأخرى. حيث تمتاز هذه المحركات بكفاءتها الجيدة وقلة حاجتها الى إجراءات الصيانة الدورية، وتمتاز ايضا بنسبة قدرة الى الوزن عالية (أي يتميز بقدرة عالية مقارنة مع وزنه الصغير) وعامل قدرة مقبول، وموثوقية عالية يمكن القول انها محركات يعول عليها في ظروف العمل المختلفة. لذا فان أكثر من 80% من المحركات الكهربائية المستخدمة في التطبيقات الصناعية هي محركات حثية ثلاثية الطور [1]. وعلى اية حال فان في اغلب هذه التطبيقات تستخدم دوائر الكترولونات القدرة كمسوقات لهذه المحركات، وغالبا ما تكون مزودة بمنظومات تحكم مغلقة (closed loop)، وذلك اما للتحكم في سرعة دورانها او للتحكم في عمليات بدنها او غيرها من الاستخدامات. وبالرغم من الوثوقية العالية لهذه المحركات الا انها تتعرض مع دوائر مسوقاتها الى اعطاب مختلفة المنشأ في اثناء عملها، ربما تتسبب في ايقافها واخراجها عن العمل، مما يؤدي الى خسائر مادية ومعنوية كبيرة ناجمة عن توقف الانتاج وضياح الوقت [2].

ان الاعطاب التي تعترض منظومة المحرك الحثي ثلاثي الطور بسبب منظومة التشغيل وبالتالي تنعكس على اداء المحرك. وعلى العموم، فان هذه الاعطاب تؤثر سلبا على اداء المحرك الحثي. حيث يعمل بعض هذه الاعطاب على ايقاف المحرك بالكامل وربما اتلافه واخراجه عن العمل، وهذه الحالة غير مقبولة خاصة في تلك التطبيقات الحرجة مثل السيارات الكهربائية وغيرها والتي لا تتحمل التوقف عن العمل عند حدوث العطب، وذلك لتعلق الامر بحياة الانسان ورفاهيته. اما البعض الاخر من الاعطاب فانه لا يعمل على ايقاف المحرك واخراجه عن العمل ولكن يؤثر سلبا على جودة التشغيل، حيث تتسبب بعض هذه الاعطاب في ارتفاع درجة حرارة المحرك وذلك نتيجة لزيادة الخسائر فيه وبعضها الاخر تعمل على توليد اهتزازات في جسم المحرك وحصول تذبذب في السرعة والعزم. ولمعرفة الاضرار الناتجة من كل نوع من انواع الاعطاب التي يتعرض لها مسوق المحرك الحثي ثلاثي الطور ومدى تأثيرها على اداء المحرك لا بد من تحليل وتمثيل مسوق المحرك الحثي ثلاثي الطور عند وقوع العطب. وفي هذا البحث سندرس تأثير اعطاب مفاتيح المسوق وتأثيرها على اداء المحرك الحثي ثلاثي الطور. والجدول 1 يبين انواع الاعطاب ونسب وقوعها في المسوق والمحرك الحثي ثلاثي الطور.

2. التحليل الرياضي للمحرك الحثي ثلاثي الطور ومسوقه عند وقوع العطب

هناك عدة دوائر مكافئة لتمثيل عمل المحرك الحثي ثلاثي الطور في الحالة المستقرة كل من هذه الدوائر لها ميزات معينة وتعتمد

وعلى فرض ان الفولتية الخارجة من المسوق موجة جيبية نقيه ومتوازنة، فان الفولتيات بعد حدوث دائرة القصر تكون:

$$\left. \begin{aligned} V_{ao} &= \frac{1}{2} V_{dc} \\ V_{bo} &= \frac{1}{2} \times k V_{dc} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{co} &= \frac{1}{2} \times k V_{dc} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} (5)$$

بالاستناد على المعادلات (1,2,3) وبعد التعويض عن احد المفاتيح بدائرة قصر والتعويض في المعادلة رقم (5) نحصل على:

$$\left. \begin{aligned} V_{an} &= \frac{1}{3} V_{dc} + \frac{1}{6} k V_{dc} \cos(\omega t) \\ V_{bn} &= -\frac{1}{6} V_{dc} + \frac{\sqrt{7}}{6} k V_{dc} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \\ V_{cn} &= -\frac{1}{6} V_{dc} + \frac{\sqrt{7}}{6} k V_{dc} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \right\} (6)$$

تشير المعادلة (6) الى ظهور مركبة فولتية مستمرة في الاطوار الثلاثة عند حدوث دائرة قصر في أحد مفاتيح المسوق (فرضا المفتاح S_1) وتكون قيمة هذه الفولتية المستمرة في الطور الذي وقع فيه العطب اكبر من قيمتها في الطورين الاخرين. ان هذه المركبة المستمرة الموجودة في اطوار المحرك الحثي تقلل من اداء المحرك الحثي لأنها تعمل على مرور تيار مستمر وهذا التيار المستمر يولد مجال مغناطيسي ساكن في الفراغ. ان المجال المغناطيسي الساكن يكون هو السائد داخل الماكنة ويعمل على اضعاف المجال المغناطيسي الدوار الناتج من الطورين السليمين ويعمل على توليد عزم كبح في المحرك (braking torque) والذي يتسبب في هبوط السرعة بصورة شديدة. فضلاً عن ذلك فان التفاعل الذي يحدث بين المركبة الاساسية للمجال المغناطيسي الدوار والمجال المغناطيسي الساكن يعمل على توليد عزم نبضي تردده تردد المركبة الاساسية للمجال الدوار الناتج من الطورين السليمين للمحرك. ان هذا العزم النبضي ضار ويتسبب في اهتزاز المحرك، لان معدله صفر خلال دورة كاملة. علاوة على ذلك فان التيار المستمر الذي يسري في الملفات يسبب ارتفاع درجة حرارة اللفائف وانهايار عوازلها وزيادة الخسائر النحاسية داخل الماكنة مما يسبب تلف الماكنة. وتبين المعادلة (7)، قيمة التيار المستمر في الاطوار الثلاثة.

$$\left. \begin{aligned} I_{a_dc} &= \frac{V_{dc}/3}{R_s} \\ I_{b_dc} &= -\frac{V_{dc}/6}{R_s} \\ I_{c_dc} &= -\frac{V_{dc}/6}{R_s} \end{aligned} \right\} (7)$$

2.2 محاكاة سلوك المحرك عند وقوع عطب قصر في احد مفاتيح المسوق (S1)

تم تمثيل هذا العطب باستخدام برنامج (Psim)، وهذا البرنامج يستخدم لمحاكاة المائن الكهربائية مع دوائر سوقها ويعتمد في التحليل على برنامج (PSPICE) وامكانية ربطه مع برنامج (MATLAB). وكما موضح في الشكل 3.

إذ تم احداث العطب في المفتاح (S_1) بعد مرور ثانية من التمثيل ويوضح الشكل 4 تيارات الاطوار قبل وبعد وقوع هذا العطب. في حين يوضح الشكل 5 منحنيات العزم، بينما يوضح الشكل 6 منحنى السرعة عند الظروف نفسها. اما الشكل 7 يوضح شكل موجة الفولتية عند وقوع هذا العطب.

وبتطبيق قانون كرشوف للفولتية على الحلقات الثلاثة في الدائرة تكون العلاقات كالاتي:

$$\left. \begin{aligned} V_{ag} &= V_{an} + V_{ng} \\ V_{bg} &= V_{bn} + V_{ng} \\ V_{cg} &= V_{cn} + V_{ng} \end{aligned} \right\} (2)$$

بتعويض المعادلة (1) في المعادلة (2) وجمع الفولتيات نحصل على:

$$\begin{aligned} V_{ug} + V_{vg} + V_{wg} \\ = V_{an} + V_{bn} + V_{cn} + 3V_{ng} \end{aligned} (3)$$

حيث اذا كان المصدر ثلاثي الطور متوازن فان

$$V_{ug} + V_{vg} + V_{wg} = 0$$

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

وتكون:

$$V_{ng} = 0$$

من العلاقة (2)، وبالرجوع الى قانون كرشوف للفولتية في العلاقة (3) نحصل على المصفوفة العامة التالية لحساب فولتيات الاطوار للمحرك بدلالة فولتية المصدر في حالة كون جميع اطوار المحرك مربوطة:

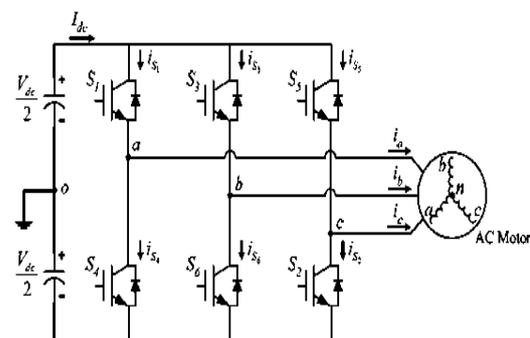
$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} (4)$$

اذا كانت جميع الاطوار مربوطة فان المعادلة (1) تكون صحيحة. اما اذا وقع احد انواع الاعطاب المذكورة سابقا في المحرك فان المعادلات السابقة ستتغير وتتغير خصائص المحرك ويختلف اداءه وسيتم دراسة خصائص المحرك الحثي ثلاثي الطور ومسوقه رياضياً عند وقوع بعض انواع الاعطاب في المحرك او المسوق.

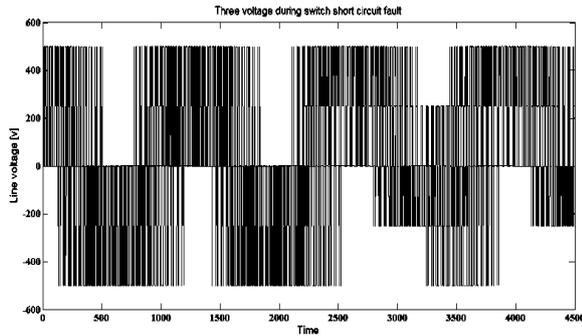
1.2 العطب الاول: قصر في احد مفاتيح المسوق

Case I: Switch short circuit in drive

عند تعرض مسوق المحرك الحثي الى عطب دائرة قصر في احدى مفاتيح المغير، فان خطراً شديداً يقع اذا تم قرح المفتاح المتم للمفتاح المعطوب (المربوط معه على نفس الساق)، حيث تحصل دائرة قصر على اطراف المصدر المستمر (DC supply) فيعمل على عطب المفتاح الاخر وتعرض الدائرة الى سحب تيار عالي جداً. تم فرض ان المفتاح المتم للمفتاح المعطوب مازال في حاله (off state). ولدراسة تأثير هذا العطب على اداء المحرك نفرض ان المفتاح العلوي في الساق (leg a) المبين في شكل 2 تعرض لحالة دائرة قصر.



الشكل 2. المسوق التقليدي مع المحرك الحثي ثلاثي الطور.



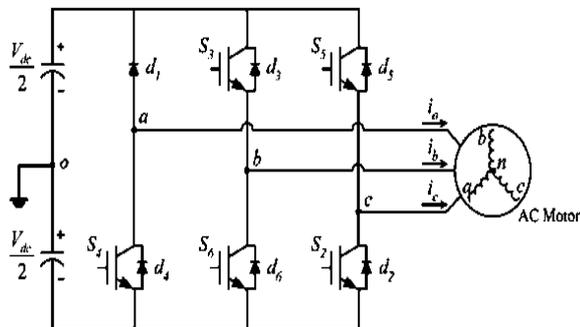
الشكل 7. فولتيات الخط في حالة وقوع قصر احد المفاتيح في السوق.

ومن ملاحظة نتائج التمثيل نجد ان القيمة العظمى لتيارات الاطوار الثلاثة هي (26A) اما قيمته بعد وقوع العطب فان التيارات تتذبذب وتمر بحالة عابرة شديدة ثم تستقر قيمهما بما تتوافق مع المعادلات رقم (5, 6, 7) وكذلك تظهر فيها مركبة للتيار المستمر التي تسبب زحف التيارات و الفولتيات عن المحور الصفري، وتكون قيمة الزحف في تيار وفولتية الطور (a) فوق المحور الصفري بمقدار $(\frac{1}{3} vdc)$ نتيجة قصر المفتاح (S_1)، اما تيار وفولتية الطورين الاخرين فيحصل فيهما زحف اسفل المحور الصفري بمقدار $(-\frac{1}{6} vdc)$ وذلك نتيجة المركبة المستمرة في موجة الفولتية التي تنعكس بنفس المقدار على موجة التيار. ان استمرار التشغيل تحت هذه الظروف ولو لفترة قصيرة سيولد عزم كبح للمحرك الحثي ثلاثي الطور يُخرج المحرك عن العمل ويؤدي الى اتلاف ملفاته بالكامل.

3.2 العطب الثاني: فتح في احد مفاتيح المسوق

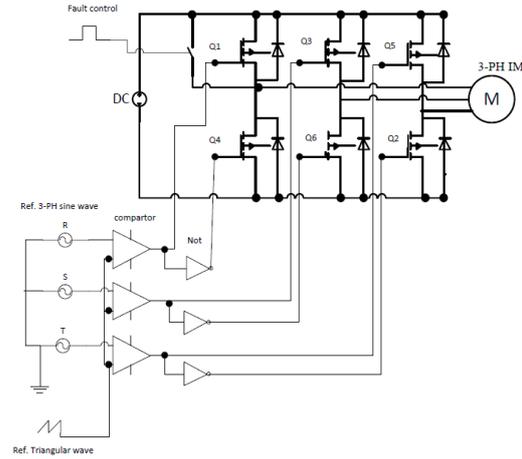
Case II: Switch open circuit in drive

يعد هذا العطب من الاعطاب الشائعة الذي يتعرض له المسوق لان اسباب هذا العطب كثيرة منها ارتفاع التيار في المفتاح فوق المقنن او حدوث خلل في دائرة القدح سواء اكان في دائرة مولد نبضات القدح (Microcontroller or DSP) او في دائرة مسوق البوابة (Gate Driver). وعلى اية حال يسبب هذا العطب عدم توازن الفولتية الخارجة من المسوق ولكنه اقل خطورة من عطب قصر احد المفاتيح. حيث يؤدي عدم توازن فولتية المسوق الى تولد مركبة تيار مستمر تسبب عزمًا نبضياً في المحرك وارتفاعاً في درجة حرارة ملفاته. ولتحليل هذا النوع من الاعطاب نفرض ان العطب وقع في المفتاح (S_1) من الطور (a) كما مبين في شكل 8.

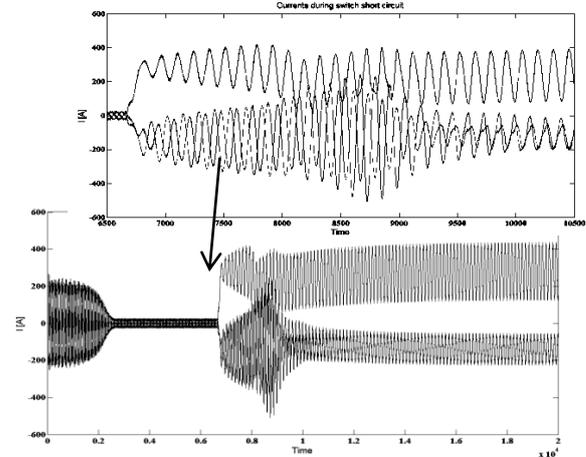


الشكل 8. عطب فتح المفتاح (S_1) في المسوق.

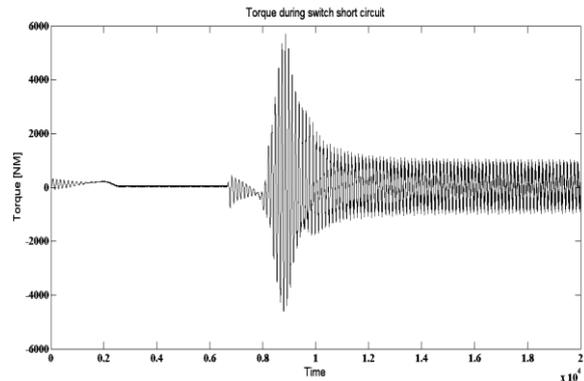
حيث عند حدوث العطب سوف لا يمر أي تيار بالاتجاه الامامي من خلال الطور (a) أي سيكون التيار المار من خلال الطور (a) تيار في اتجاه واحد فقط. واذا كانت نقطة التعادل للمحرك غير مربوطة سينقسم هذا التيار بين الطورين السليمين. ويمكن ايجاد فولتية الطور (a) اعتماداً على حالة تياره وحالة المفتاح (S_4) المتمم للمفتاح



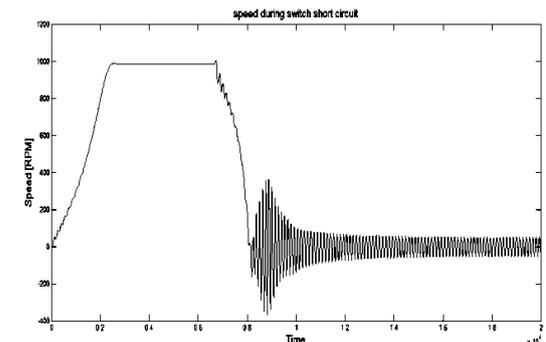
الشكل 3. تمثيل عطب قصر احد مفاتيح المسوق.



الشكل 4. تيارات الاطوار في حالة وقوع قصر احد المفاتيح في السوق.



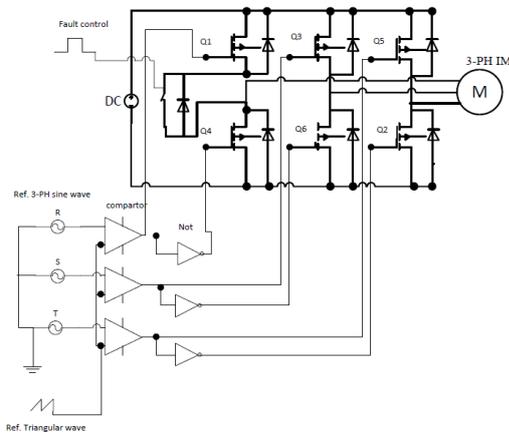
الشكل 5. العزم قبل وقوع عطب قصر في احد مفاتيح المسوق وبعده.



الشكل 6. منحنى السرعة قبل وقوع عطب قصر في احد مفاتيح المسوق وبعده.

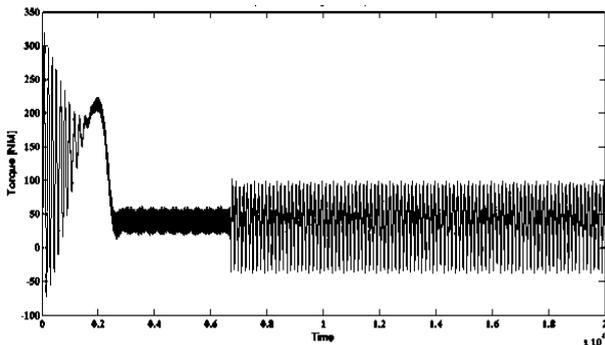
4.2 محاكاة سلوك المحرك عند وقوع عطب فتح احد مفاتيح المسوق

تم تمثيل هذا العطب ايضا في برنامج (Psim) وكما موضح في الشكل 9.

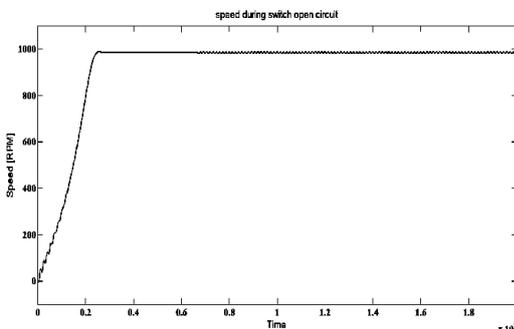


الشكل 9. تمثيل عطب فتح احد مفاتيح المسوق.

إذ تم احداث العطب في المفتاح (S₁) ايضا بعد مرور ثانية من التمثيل لكي يتم المقارنة بين تأثير العطبين على المحرك. ويوضح الشكل 10 تيارات الاطوار قبل وبعد وقوع هذا العطب. في حين يوضح الشكل 11 منحنى العزم، أما الشكل 12 السرعة عند الظروف نفسها. بينما يعرض الشكل 13 موجة الفولتية عند وقوع عطب فتح احد مفاتيح المسوق.



شكل 10. تيارات الاطوار في حالة وقوع عطب فتح احد المفاتيح في المسوق.



الشكل 11. منحنى العزم قبل وقوع عطب فتح في احد مفاتيح المسوق وبعده.

تم تمثيل عطب المفتاح (S₁) في دائرة مسوق المحرك الحثي ثلاثي الطور مع الابقاء على الدايدود حر الاطلاق (freewheeling diode d₁) وذلك من اجل دراسة تأثير حدوث هذا العطب على اداء المحرك وقد تمت مراقبة موجة تيارات الاطوار لهذا المحرك قبل واثناء وبعد وقوع العطب وهي كانت كما موضحة في الشكل 10 حيث نجد ان الجزء الموجب لتيار الطور (a) يصبح صفراً اما الجزء السالب

المعطوب. كذلك يمكن ايجاد فولتية الطورين السليمين مالم تتغير حالة نبضات فتح مفاتيحهما بعد وقوع العطب على النحو الاتي:

$$V_{ao} = \begin{cases} -\frac{1}{2} V_{dc} & \text{For } I_a > 0 & \text{state 1} \\ -\frac{1}{2} V_{dc} & \text{For } I_a < 0 & \text{state 2} \\ \frac{1}{2} V_{dc} & \text{For } I_a < 0 & \text{state 3} \\ \frac{1}{2} (V_{bo} + V_{co} + 3e_a) & \text{For } I_a = 0 & \text{state 4} \end{cases}$$

$$\left. \begin{aligned} V_{bo} &= k V_{dc} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{co} &= k V_{dc} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ويمكن توضيح الحالات الاربعة في احتساب الظاهرة في المعادلة (8) على النحو الاتي:

الحالة الاولى

وهي وتمثل لحظة وقوع العطب اي الحالة العابرة للانتقال من حالة اللاعطب الى حالة العطب، في هذه اللحظة يكون الدايدود (d₄) في حالة توصيل. وفيها تكون ($V_{ao} = (-\frac{1}{2}) V_{dc}$) عندما يكون ($I_a > 0$)

الحالتين الثانية والثالثة

تظهران خلال النصف السالب لتيار الطور (a). في هاتين الحالتين فان فولتية الطور a، تكون متناوبة بين ($\frac{1}{2} V_{dc}$) و ($-\frac{1}{2} V_{dc}$) اعتمادا على حالة المفتاح S₄. يمكن كتابة فولتيات اطوار المحرك نسبة الى نقطة تعادله على النحو الاتي:

$$\left. \begin{aligned} V_{an} &= \frac{1}{2} \times k V_{dc} \cos(\omega t) \\ V_{bn} &= \frac{1}{2} \times k V_{dc} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{cn} &= \frac{1}{2} \times k V_{dc} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

حيث نلاحظ ان الفولتيات في الحالتين الثانية والثالثة تأخذ شكلها الجيبي الطبيعي ولا يوجد أي تغيير فيها عن حالة ما قبل العطب.

الحالة الرابعة

و يكون فيها تيار الطور (a) مساويا للصفر ($I_a=0$) نتيجة العطب الواقع في المفتاح (S₁). وتكون الفولتية (V_{ao}) كما مبيّنة في المعادلة رقم (8) مساوية لـ ($\frac{1}{2} (V_{bo} + V_{co} + 3e_a)$). لذلك تكون فولتية الطور (a) نسبة الى نقطة التعادل مساوية للفولتية العكسية المتولدة في هذا الطور ($V_{an} = e_a$).

$$V_{ao} = \frac{(V_{ao} + V_{bo} + 3e_a)}{2} \quad (10)$$

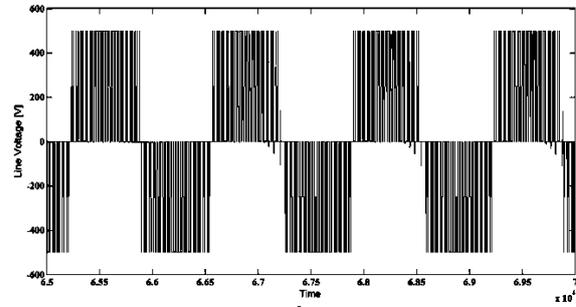
وبالتالي تكون فولتيات الاطوار الثلاثة نسبة الى نقطة التعادل عند الحالة الرابعة على النحو الاتي:

$$\left. \begin{aligned} e_a &= V_{an} \\ V_{bn} &= \frac{1}{2} (V_{bo} - V_{co} - e_a) \\ V_{cn} &= \frac{1}{2} (V_{bo} - V_{co} - e_a) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

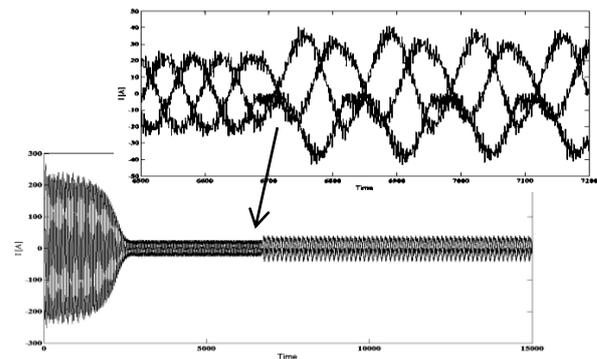
topology; a comparison of features, cost, and limitation. *IEEE International Electric Machine and Drive Conference*. 2003, June 1-4; Madison, WI USA.

- [3] Yeh CC. Fault tolerant operations of induction motor-drive systems. Ph.D. Thesis: Marquette University; 2008.
- [4] Alavije HS, Akhbari M. Investigation of induction motor drive behavior in low-cost fault tolerant control for electric vehicles. *The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOC02011)*. 2011, 6-7 June; Shah Alam, Selangor, Malaysia: 2011.
- [5] Zhu J. Modeling, simulation and implementation of fault tolerant permanent magnet motor drive with redundancy. Ph.D. Thesis: University of Adelaide; 2008.
- [6] Rashid MH. Power electronics handbook. Academic Press; USA: 2001.
- [7] Bose BK. Power electronics and motor drives. Elsevier Inc; 2006.
- [8] Ahmad M. High performance AC drives. Springer-Verlag London Limited; 2010.
- [9] Lillo L, Empringham L, Wheeler PW, Sudarat K, Gerada C. Multiphase power converter drive for fault-tolerant machine development in aerospace applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2010; **57** (2): 575-583.
- [10] de A RL, Ribeiro CBJ, da Silva ERC, Lima AMN. Fault detection of open-switch damage in voltage-fed pwm motor drive systems. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2003; **18** (2): 587-593.
- [11] Mendes AMS, Marques Cardoso AJ. Fault diagnosis in a rectifier-inverter system used in variable speed ac drives by the average current park's vector approach. *European Power Electronics Conference*. 1999: pp. 1-9.
- [12] Wang YJ. Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2001; **16** (3): 270-275.
- [13] Ghate VN, Dudul SV, Dhole GM. Generalized model of three-phase induction motor for fault analysis. *IEEE Region 8 Sibircon* 2008: 232-237.
- [14] Neto LM, Camacho JR, Salerno CH. Analysis of a three-phase induction machine including time and space harmonic effects: The A, B, C reference frame. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 1999; **14** (1): 80-85.

فيبقى موجوداً وتظهر بذلك مركبة تيار مستمر سالب في الطور (a) وهي متوافقة مع المعادلة (8) اما لو وقع العطب في المفتاح (S₂) وتكون مركبة التيار المستمر عند القيمة نفسها ولكنها تكون موجبة اي عكس الحالة الاولى تماما. اما الشكل 11 يعرض منحنى العزم بينما يبين الشكل 12 منحنى السرعة لظروف التشغيل نفسها ويتبين من خلال الشكل ان العزم يتذبذب والسرعة تهبط قليلاً عن قيمتها قبل وقوع العطب. اما فولتية الطور المبينة في الشكل 13 تحافظ على شكلها تقريبا ولكن تظهر نبضات شوكية (spike) تُعرض المفاتيح الاخرى الى تغيير عالي للفولتية مع الزمن $(\frac{dv}{dt})$.



الشكل 12. السرعة قبل وقوع عطب فتح في احد مفاتيح المسوق وبعده .



الشكل 13. الفولتية بعد وقوع عطب فتح في احد مفاتيح المسوق.

3. الاستنتاجات

من هذا البحث يمكن استنتاج ما يلي:

- يتأثر أداء المحرك الحثي ثلاثي الطور عند وقوع اعطاب في المسوق.
- يختلف تأثير هذه الاعطاب اعتمادا على نوع العطب وموقعه وشدته.
- أكثر العطبين التي تم دراستهما تأثيرا على أداء المحرك وربما يؤدي الى اتلاف المحرك بالكامل هو عطب قصر احد مفاتيح المسوق.
- كلا العطبين يؤديان الى زيادة تيارات الاطوار وارتفاع درجة حرارة ملفات المحرك; نتيجة مرور التيار العالي.
- كلا العطبين يؤديان الى حصول تذبذب في السرعة والعزم واهتزاز جسم الماكينة اعتمادا على نوع العطب وشدته.

المصادر

- [1] Ameen YMY. Advanced methods for induction motors fault diagnosis. Ph.D. Thesis: University of Mosul; Mosul: Iraq; 2007.
- [2] Welchko BA, Lipo TA, Jahns TM, Schulz SE. Fault tolerant three-phase ac motor drive