Improving maintenance processes in a transformers maintenance center using Failure Mode and Effect Analysis "FMEA"

تحسين عمليات الصيانة في مركز صيانة المحولات الكهربائية بإستخدام تقنية أنماط الأعطاب وتحليل آثارها (FMEA)

مقدم من د. محسن فرج عيسى م. أجود الهاميسي
قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية كلية الهندسة جامعة طرابلس/ ليبيا
mohsenfaraj@yahoo.com

Abstract

The FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) is a quality tool used to identify and prevent potential failures in a product or process. The FMEA process involves identifying potential failures, determining the likelihood of occurrence, the severity of consequences, and the ability to detect the failure.

In the context of the Libyan industrial and service sectors, the use of quality improvement tools, including FMEA, is a significant challenge due to the difficulty in applying quality improvement methodologies and techniques. However, a study was conducted on the possibility of developing and improving maintenance operations using FMEA for the electrical transformer maintenance center that is managed by the Electricity Services Company which performs its services for the General Electricity Company. A work team formed in the center from engineers involved in the different stages of the electrical transformers maintenance processes that includes among its members the authors of this research.

The study aimed to identify the potential failure modes, their effects, and the causes of these failures for maintenance processes, and determine the the severity, frequency, and ease of detection of each failure mode. The Risk Priority Number (RPN) for each process was calculated for each maintenance task in order to address the most task those urgently need improvement.

The FMEA table for transformers under maintenance reveal that the oil refining and heating process, where the failure to replace the filters in a timely manner and not to heat the oil before pouring it to the required temperature (70 Celsius) got the highest RPN number = (200) Therefore, the first priority of improvement in the maintenance process must start from this process (oil refining), followed by the process of drying the transformer from humidity in the furnace before closing it (RPN value = 180), then the process of wire winding and insulation design (RPN = 126).

As for the maintenance of transformers during work, i.e. in the transformer stations, several meetings were held with engineers, technicians and managers related to the transformer work.

The FMEA table related to transformers during work reveals that the highest RPN number was gotten by the overloaded tap switch that resulted in cutting the tap switch wires and the transformer stop functioning.
It was recommended to continue applying this application every period in order to reduce the risks of potential collapses and thus increase the effectiveness, productivity and performance of maintenance and increasing the life span of working transformers .

Key Words: Quality improvements, Quality tools, Maintenance, Failure Mode and Effect Analysis, Risk Management, Risk Priority Number (RPN).

ملخص

يعد FMEA (تحليل وضع الفشل والتأثير) أداة عالية الجودة تستخدم لتحديد ومنع حالات الفشل المحتملة في منتج أو عملية. تتضمن عملية FMEA تحديد حالات الفشل المحتملة، وتحديد احتمالية حدوثها، وشدة العواقب، والقدرة على اكتشاف الفشل.
في سياق القطاعين الصناعي والخدمي الليبي، يمثل استخدام أدوات تحسين الجودة بما في ذلك FMEA، تحديًا كبيرًا بسبب صعوبة تطبيق منهجيات وتقنيات تحسين الجودة، إلا أنه تم إجراء دراسة حول إمكانية تطوير وتحسين عمليات الصيانة باستخدام FMEA لمركز صيانة المحولات الكهربائية الذي تديره شركة الخدمات الكهربية التي تقدم خدماتها للشركة العامة للكهرباء. تم تشكيل فريق عمل في المركز من مهندسين معنيين بالمراحل المختلفة لعمليات صيانة المحولات الكهربائية ويضم بين أعضائه مؤلفي هذا البحث.
هدفت الدراسة إلى التعرف على أوضاع الفشل المحتملة وتأثيراتها وأسباب هذه الأعطال لعمليات الصيانة، وتحديد مدى خطورة كل وضع من أوضاع الفشل وتكراره وسهولة اكتشافه. تم حساب رقم أولوية المخاطر (RPN) لكل عملية من عمليات الصيانة من أجل تحديد مصادر الخطر التي يجب معالجتها بشكل عاجل لمنع حدوث تعطيل أو انهيارات في عمليات الصيانة.
ويكشف جدول FMEA للمحولات تحت الصيانة أن عملية تكرير وتسخين الزيت مترافقة مع عدم استبدال المرشحات في الوقت المناسب وعدم تسخين الزيت قبل صبه إلى درجة الحرارة المطلوبة (70 مئوية) قد حصلت على أعلى رقم (RPN = 200) ولذلك فإن الأولوية الأولى للتحسين في عملية الصيانة يجب أن تبدأ من هذه العملية (تكرير الزيت)، تليها عملية تجفيف المحول من الرطوبة في الفرن قبل إغلاقه (قيمة RPN = 180)، ثم عملية لف الأسلاك وتصميم العزل (RPN = 126).
أما بالنسبة لصيانة المحولات أثناء العمل أي في محطات المحولات فقد تم عقد عدة اجتماعات مع المهندسين والفنيين والمدراء فيما يتعلق بأعمال المحولات. يوضح جدول FMEA المتعلق بالمحولات أثناء العمل أن أعلى رقم RPN تم الحصول عليه نتيجة للتحميل الزائد على مفتاح الصنبور(Tap Switch) الذي يؤدي إلى قطع أسلاك مفتاح الصنبور ومن ثم توقف المحول عن العمل. كذلك تم في كلا الجدولين توضيح عمليات التحكم الحالية (Current Controls) سواء للمحولات تحت الصيانة أو المحولات العاملة من أجل عقد مزيد من حلقات العصف الفكري لستنباط عمليات تحكم أكثر فعالية بحيث تقلل من قيم ال RPN الخاصة بكل عملية أو مهمة من المهام الواقعة على المحولات.
وتمت التوصية بالاستمرار في تطبيق هذا التطبيق كل فترة وذلك لتقليل مخاطر الأعطال المحتملة وبالتالي زيادة فعالية وإنتاجية وأداء الصيانة وزيادة العمر الافتراضي للمحولات العاملة.

مقدمة Introduction:

أدى التطور السريع للكثير من المفاهيم الإدارية والتقنية إلى حث المنشآت الخدمية والصناعية على البحث عن الطرق والأساليب والاستراتيجيات المناسبة الرامية لتحقيق أهدافها وتعزيز ما تقدمه من خدمات ومنتجات مع ما لديها من موارد وإمكانات. وقد أصبح التدريب على الجودة وتحسين مستوى المنتج أو الخدمة المقدمة من ضمن أوليات المؤسسات في كل المجالات بحيث يتم إنتاج المنتج أو الخدمة بالطريقة التي تم التخطيط لها والتي بطبيعة الحال تستجيب لرغبات وتطلعات الزبون.

لازال تطبيق مفاهيم إدارة الجودة واستعمال ادواتها في ليبيا محدودا ولازالت النظرة إلى تطبيق وتطوير الجودة كلاما نظريا بعيدا عن التطبيق الحقيقي حيث يتم تدريس منهجيات تطبيق الجودة بمختلف مسمياتها دون تطبيق ملحوظ لها في المؤسسات الصناعية والخدمية إلا فيما ندر. من هنا رأينا أن نحاول تحسس مدى التحسن الممكن إدراكه في أداء المؤسسات الصناعية والخدمية في ليبيا من خلال العمل على حالة دراسية معينة وهي امكانية تحسين أداء العمليات في مصنع صيانة المحولات الكهربية التابع لشركة الخدمات الكهربية وأيضا تحسين أداء المحولات الكهربية وهي تعمل داخل المحطات وذلك من خلال تطبيق إحدى أدوات أنظمة إدارة وتطوير الجودة وهي وسائط الفشل وتحليل الآثار(Failure Mode and Effect Analysis FMEA).

نسعى في هذا البحث إلى محاولة تطبيق بعض مفاهيم وأدوات إدارة الجودة حيث سعينا لتطبيق إحدى أدوات تطوير الجودة والتقليل من المخاطر وهي أداة ال (FMEA). ومن خلال جمع البيانات في إحدى المقرات الصناعية الخدمية وهي مصنع صيانة وإصلاح محولات الكهرباء المستخدمة بالشركة العامة للأعمال الكهربية وكذلك البيانات الخاصة بالمحولات الداخلة في الخدمة لمحاولة تحقيق الأهداف التالية :

1- امكانية تطبيق أداة ال FMEA لتحسين أداء عمليات الصيانة التي يتم إجراءها للمحولات بمصنع صيانة المحولات.
2- الكشف عن كل المخاطر والعيوب الممكن حدوثها أثناء عملية الصيانة لتحسين بعض أو كل مراحل الصيانة بالمصنع.
3- الكشف عن كل المخاطر والعيوب التي من الممكن أن تحدث للمحولات وهي في العمل حتى يمكن إطالة عمرها إلى أقصى حد ممكن والتقليل من التوقفات التي تحصل في المحطات نتيجة لتوقف عمل المحولات.
4- محاولة إيجاد نموذج لامكانية تطبيق أداة ال FMEA كإحدى أدوات أنظمة الجودة في الأماكن المشابهة.
5- تعميم وتعزيز المعرفة بأنظمة الجودة وتطبيق أدواتها في مختلف المؤسسات الصناعية والخدمية في ليبيا.

وسائط الفشل وتحليل الآثار(Failure Mode and Effect Analysis):

تعتبر تقنية ال FMEA إجراءً مهمًا لتحديد وتقييم العواقب أو المخاطر المرتبطة بأنماط الفشل المحتملة. يعد ال FMEA تحليلًا نوعيًا Qualitative Analysis ويتضمن عادةً قائمة بأنماط الفشل والأسباب المحتملة لكل فشل وتأثيرات الفشل وخطورتها والإجراءات التصحيحية التي يمكن اتخاذها.

استعملت منهجية FMEA لأول مرة في سنوات الستينات في ميدان صناعة الطيران من أجل تحليل سلامة الطائرات. و قد اقتصر استعمالها و لمدة طويلة على دراسة مدى موثوقية المعدات. في نهاية الستينات امتد استعمال هذه المنهجية إلى ميدان صناعة السيارات. و هكذا اعتمدها العديد من مصنعي السيارات مثل تويوتا و نيسان و بي ام دبليو و بيجو و فورد و فولفو و كريزلر و غيرهم. و في سنة 1988 تم تضمين منهجية FMEA من طرف منظمة إيزو في نظام QS 9000 الخاص بالسيارات (1).

وتصنف منهجية FMEA على أنها واحدة من تقنيات التحليل التنبئي، تطبق بشكل خاص على المنتجات و العمليات (processes) و تمكن من تقدير مخاطر حدوث الأعطاب و النتائج المترتبة عليها. و يتميز كل عطب بثلاث خصائص:

- الشدة (Severity : S) بالنسبة للمستهلك.
- التردد (Occurrence : O) : قلة أو كثرة ظهور العطب.
- الكشف (Detection : D) : و هو مدى صعوبة اكتشاف العطب.

وحاصل ضرب هذه الخصائص الثلاث هو ما يصطلح عليه برقم أولوية الخطر أو مستوى أولوية الخطر (Risk Priority Number :RPN) : RPN = S x O x D

وهنا تعريف لبعض المصطلحات المستعملة في منهجية FMEA المستعملة في هذا البحث:

الكشف (Detection) : هو تقييم لمدى قدرة المراقبة على كشف سبب العطب أو العطب نفسه.

العطب (Failure) : نتكلم عن العطب بالنسبة لمنتج أو مكون أو مجموعة حينما لا يعمل هذا الأخير (المنتج أو المكون أو المجموعة)، أو لا يعمل في الوقت المحدد، أو لا يتوقف في الوقت المحدد، أو يعمل في وقت غير مرغوب، أو يعمل ولكن دون مستوى الأداء المطلوب.

أنماط العطب (Failure modes) : الطرق التي يتجلى بها العطب (أو الإنحراف عن المواصفات) بالنسبة لمنتج أو مكون أو عملية ما. وهذا النمط يمكن أن يكون على شكل تشوه، أو اهتزاز، أو تعثر، أو ارتخاء، أو تآكل، أو تسرب، أو ضعف في الأداء، أو تماس كهربائي، أو انتفاخ، أو تجاوز الحد الأقصى المسموح به، إلخ.

- **أسباب العطب** (Failure causes) : أسباب العطب هي الحيثيات المتعلقة بالتصميم أو التصنيع أو الاستخدام و التي كانت السبب في العطب.

- **تأثير العطب** (Failure effects) : هي الآثار المترتبة عن العطب و هي أيضا الأعراض التي يمكن بواسطتها الكشف عن العيب (الخلل في أداء الوظيفة المطلوبة) و كذلك النتائج المترتبة عليه.
- **التردد** (Occurrence) : التردد هو تقييم لعدد مرات ظهور عطب معين، سواء كان ذلك عند مرحلة تصميم أو تصنيع أو عند استعمال المنتج.
- **رقم أولوية الخطر** (Risk priority number) RPN: هو حاصل ضرب الشدة Severity(S) و التردد Occurrence (O) و الكشف Detection (D) : (RPN=S.O.D). ويستخدم هذا الرقم كمرجع يعرف منه أكثر العمليات حاجة للتطوير والتحسين ومدى تأثيرها على النظام كاملا. رقم RPN لكل عملية فرعية أو عضو فرعي في المجموعة يمكننا من ترتيب الأعطاب المحتملة حسب أولويتها مع إعطاء الأولوية للعطب الذي يقابله أكبر رقم RPN (أي من الأكبر إلى الأصغر).
- **الشدة** (Severity) : الشدة هو تقييم لأهمية تأثير العطب المحتمل على الزبون.(2)

تظهر مراجعة الدراسات السابقة أن تقنية FMEA قد تم استعمالها في بعض من محولات الطاقة.
وفقا لتعريف [3] ANSI/IEEE C57.117-1986 ، فإن المحول هو عبارة عن جهاز كهربي يحتوي على لفات وقلب مغناطيسي. ويشمل المحول جميع المكونات ذات الصلة بالمحولات، مثل البطانات bushings، ومغيرات الحنفيةload tap changers ، والمراوح، وأجهزة قياس درجة الحرارة، وما إلى ذلك. يمكن تصنيف المحولات إلى عدة أنواع منها محولات القدرة power transformers، محولات الآليات auto transformers ، محولات التنظيم regulating transformers ، بناء على استخداماتها تصنف المحولات إلى المحولات الفرعيةsubstation transformers ، ومحولات ربط التعادل transmission tie transformers ، ومحولات الوحداتunit transformers .
عملت Sabina Karlsson (2006) على موثوقية المحولات لتحليل البيانات عن طريق تحليل الغاز الذائب (Dissolved Gas Analysis DGA) وهي تقنية تستخدم على نطاق واسع لتقييم حالة المحولات المغمورة بالزيت ، وهي نفس المحولات المستخدمة من قبل الشركة العامة للكهرباء في ليبيا. يمكن الكشف عن الأعطاب الأولية داخل المحولات من خلال تحليل الغازات المذابة في المحولات المغمورة في الزيت. وحاولت في بحثها لتحليل البيانات المتاحة من (DGA) التحقيق في ما إذا كان هذا النوع من البيانات قد تكون مفيدة في النمذجة الكمية Quantitative modeling لموثوقية المحولات. وقد لخصت في بحثها أن هناك صعوبات في انهاء المشروع بالكامل بسبب النقص ومحدودية توافر البيانات الكافية. [4]
واستخدم Shafiee and Dinmohammadi, 2014 تقنية ال FMEA في تحليل وتقييم وتحديد الأولويات المحتملة المعروفة بوسائط الفشل المستخدمة من قبل مستخدمي توربينات الرياح. ووجد الباحثون أن هناك قيود مرتبطة بالتنفيذ العملي لل (FMEA) في مزارع الرياح وخصوصا عند حساب (RPN) لنظام توربينات الرياح. وقد طوروا أداة رياضية لتحليل وضع الفشل وتحليل نظام توربينات الرياح. [5]
وقد قام كلا من Taylor and Sinhaبتحليل أعطاب و فشل محولات الطاقة المغمورة في الزيت باستخدام تحليل الموثوقية بطريقة (FMEA) وتحليل شجرة الأعطال (Failure Tree Analysis FTA) مترابطة مع مخطط كتلة الموثوقية Reliability Block Diagram (RBD) و المخطط المنطقي logic diagram (LD). وقد توصلوا إلى استنتاج مفاده أنه من خلال تصميم الأنظمة التي تتضمن أدوات وتقنيات (FMEA) و (FTA) و (RBD) يمكن من خلالها تحسين وظيفة الصيانة لتصبح أكثر استباقية. [6]

وقد اقترح Bian and Yang 2015 استخدام FMEA على أساس نموذج السحاب cloud model لتقييم تعرض محولات الطاقة للمخاطر وقد أوضحوا ان هذا النموذج يستطيع وبفاعلية تجاوز الاخطاء التي تحصل عند استخدام الطريقة التقليدية في استخدام FMEA. [7]
واستخدم Akbari et al; تقنية (FMEA) للمحولات وقاموا بتحليلها والتحصل على النتائج بالرسوم البيانية والمصفوفات لفرز المكونات الأكثر أهمية وفرز وسائط الفشل وأسبابها. [8]
واستخدم Khalil et al. 2014 تقنية FMEA لدراسة أسباب انقطاع محولات الطاقة التي تحول جهد 220 كيلو فولت. وقد قدموا تحليل الآثار البدائية والنهائية أيضا، وأوصوا باتخاذ اجراءات لتجنب هذه الانقطاعات. وقد تم النظر بعناية في تخصيص أرقام أولوية المخاطر لمختلف أسباب الانقطاع التي قد تحدث عند هذا المستوى من الجهد. [9]
وأيضا قام H.-P. Berg, N. Fritze, 2011 بالتحقيق في ظواهر تزايد عدد انفجارات المحولات والحرائق في جميع أنواع محطات توليد الكهرباء في جميع أنحاء العالم، فيما يتعلق بالأسباب الجذرية المحتملة، وشرح التدابير التشخيصية الممكنة لتجنب مثل هذه الأحداث وتعزيز الموثوقية للمحولات الكهربائية. [10]

استعمال تقنية FMEA للمحولات الكهربية (Transformers) بالمصنع:

أهم مراحل تطبيق منهجية تحليل أنماط الأعطاب وتأثيرها و حرجيتها من قبل الباحثين:

- طرح الإشكالية : تعريف و توضيح الهدف المتوخى و مجال تطبيق المنهجية.

تشكيل فريق FMEA : وقد تم تشكيل فريق عمل يضم الباحثان ومدير العمليات بالمصنع وبعض المهندسين والفنيين حيث تم تجميع البيانات التي تشمل جميع مراحل عمليات الصيانة بتفاصيلها منذ ورود المحول للصيانة حتى تسليمه جاهزا للعمل مع تحديد كل المتطلبات اللازمة لتعبئة الجداول الخاصة بال FMEA .
التحليل الوظيفي : يقوم الفريق بتفكيك النظام إلى نظم فرعية. هذه الأخيرة تفكك بدورها إلى عناصر أولية. لكل عنصر من هذه العناصر يقوم الفريق بتحديد وظائفه الأساسية و القيود المسلطة عليه (كالقوانين والأنظمة و المعايير وما إلى ذلك).

- تحليل كيفي للأعطاب : إحصاء أنماط العطب ومسبباتها (أسباب العطب) و كذلك تأثيرها (تأثير العطب).
- تحليل كمي للأعطاب : لكل نمط من أنماط العطب ، يقوم الفريق بتقييم الشدة (Severity) و تردد الظهور (Occurrence) و احتمال عدم الكشف (Detection) و بالتالي احتساب رقم أولوية الخطر (RPN).
- تحديد رقم أولوية الخطر الحرج: بعد ترتيب الأعطاب المحتملة حسب رقم أولوية الخطر (من الأكبر إلى الأصغر)، يقوم الفريق بتحديد رقم RPN الحرج.
- وضع خطة العمل : تحضير مجموعة إجراءات (ماذا، من، كيف، متى) لإزالة أسباب العطب. هذه الإجراءات يمكن أن تكون إجراءات تصحيحية أو إجراءات وقائية.
- تنفيذ ومتابعة خطة العمل : المكلفون بخطة العمل تقع عليهم مسؤولية تنفيذ و متابعة الإجراءات التصحيحية (أو الوقائية) وتسجيل النتائج التي تم الحصول عليها.

- التحقق من فعالية الإجراءات : حيث يجب متابعة تنفيذ الإجراءات للتحقق من فعاليتها. في الحالات التي تكون فيها الإجراءات المقترحة غير قادرة على تحقيق النتيجة المرجوة، يجب القيام بدراسة FMEA جديدة من أجل تطوير حلول جديدة.

الجزء العملي: Practical work

يقع مصنع صيانة المحولات الكهربائية التابع للشركة العامة للكهرباء في مدينة طرابلس تحديدا في منطقة الفرناج, وتشتمل برامج العمل في المصنع على القيام بالفحوصات الفنية لكافة المحولات الواردة لغرض الصيانة وفق المعايير المطلوبة الى جانب اصدار الشهادات اللازمة لكافة المحولات التي شملتها عمليات الصيانة للتأكيد على جاهزيتها وقدرتها على العمل. ويحتوي المصنع على عدة أقسام منها: قسم التصميم، قسم اللف، قسم القلب الحديدى، قسم تجميع القلب الحديدى، قسم تجميع المحولات، قسم التجهيز،قسم الاختبار والجودة، قسم الحدادة وقسم النجارة.

تجميع البيانـات (DATA COLLECTION) :

تم تجميع البيانات عن طريق الزيارات الميدانية الى المصنع , حيث تم تجميع البيانات التي تشمل جميع مراحل عمليات الصيانة بتفاصيلها منذ ورود المحول للصيانة حتى تسليمه جاهزا للعمل مع تحديد كل المتطلبات اللازمة لتعبئة الجداول الخاصة بال FMEA شاملة مدى وشدة خطورة كل أنماط الأعطاب وترتيب أولوياتها من ناحية الخطورة واستعمال الجداول كأداة ومرجع لكل عمليات الصيانة التالية بالمصنع كجزء من تطوير كفاءة وجودة الصيانة.

بناء جداول ال FMEA :

- في هذا البحث تم اعتماد الترقيم من 1 الى 10 كمرجع لحساب الشدة والتكرار وسهولة الكشف للأعطاب والانهيارات التي قد تحصل أثناء القيام بعملية صيانة المحول بحيث تزداد الخطورة كلما زاد الرقم من 1 باتجاه الرقم 10.

كما هوموضح بالجدول التالي:

Occurrence (*O*)	Severity (*S*)	Detection (*D*)	Ranking
Failure is unlikely	No discernible effect	Almost certain	1
Low: Relatively few failures	Very minor	Very high	2
	Minor	High	3
Moderate: Occasional failures	Very low	Moderately high	4
	Low	Moderate	5
	Moderate	Low	6
High: Repeated Failures	High	Very low	7
	Very high	Remote	8
Very high: Failure is almost unavoidable	Hazardous with warning	Very remote	9
	Hazardous without warning	Absolutely uncertain	10

جدول (1) اعتماد درجات تقييم الشدة والتكرار وسهولة الكشف في جداول FMEA

لكل سبب فشل للعمليات التي تم تعريفها بمركز الصيانة، تم تحديد عناصر التحكم (controls) المتاحة للحد منها أو القضاء على المخاطر المرتبطة بأسباب وقوع الفشل .
بمجرد تحديد قيم ال RPN لعمليات الصيانة فانه يصبح بالامكان تحديد أولويات التطوير والتحسين لتلك العمليات التي سجلت أعلى قيم لل RPN ثم تطبيق التحسينات والتوصيات ثم تسجيل قيم RPN جديدة للعمليات واختيار العمليات التي سجلت أعلى قيم RPN وهكذا تكون عملية التحسين المستمر للعمليات. في هذا البحث تم تحديد العمليات التي لها الأولوية في عملية التطوير والتحسين والجدول التالي يبين جداول ال FMEA الخاصة بالمحولات الموجودة بالمصنع لأغراض الصيانة وهي كالتالي:

Process / Function	Potential Failure Mode	Potential Effects of Failure	Severity	Potential Causes / Mechanisms of Failure	Occurrence	Detect	Current Design Controls Detection	R.P.N.	Recommended Actions
إختبار test ratio الخاص باللفات	حدوث short & أمبير عالي غير حقيقي	إتخاذ قرار خاطئ بعدم صلاحية اللفات false indecation	5	تركيب الأقطاب بشكل غير صحيح أثناء الإختبار	6	4		120	
				وجود قطع في كوابل أجهزة الإختبار	3	7	إستبدال الكوابل من حين إلى آخر (فترات	105	تدريب الفنيين / double check
عملية تصميم اللف للسلك والعازل	أخطاء في عملية التصميم	بقية عمليات الصيانة تتم بطريقة غير صحيحة	7	خطأ في حساب المعادلات الخاصة بالتصميم	2	9	test ratio	126	
				أخذ قياسات اللف من المحول القادم للصيانة بطريقة غير صحيحة	4	2		56	
		خسائر في المال والوقت	7	عدم إختيار السمك المناسب للورق العازل	5	3	high voltage	105	
				عدم إختيار السلك المناسب	6	2	no load losses	84	
عملية لف السلك (L.V)	صناعة لفة أكبر أو أصغر من المجال المخصص للفة في الكور	عدم دخول اللفة في الكور أو دخولها بمجال بخلوص كبير	6	عدم تطابق قطر اللفة القادم في وتيقة التصميم مع المتوفر في المصنع	1	1	no control	6	
	صناعة لفة بعدد لفات أقل من المطلوب	عدم النجاح في المرور من إختبار Test ratio	6	عدم تطابق عدد اللفات حسب ماهو وارد في وتيقة التصميم	2	2	test ratio	24	
	تسريب جهد داخل المحول (Short)	إعطاب كامل اللفة	9	تمزق الورق العازل نتيجة للطرق اللازم لتصفيف الاسلاك في اللف	1	1	double hertiz	9	
عملية لف السلك (H.V)	صناعة لفة بعدد لفات أقل من المطلوب	فشل في إختبار test ratio	4	إهمال وعدم تركيز الفني	4	2	test ratio	32	
				خلل في جهاز عدَّاد اللفات	3	4		48	
				إنحراف مجال السلك عن مساره في البكرة مما يسبب كشط في طبقة الورنيش العازلة	1	2		8	
	عدم وجود عزل كافئ (غطاء العزل والورق الخاص) الخاص بالأسلاك الخارجة من اللفة والداخلة الى مغير الخطوات	فشل في إختبار high voltage	9	عدم تركيب ورق العزل قبل توصيل الاسلاك بـ tap switch	2	1	double voltage	18	
				خلل في تصنيع ورق عزل اسلاك tap switch	1	8		72	

	test ratio	16	1	4	توصيل الأسلاك بشكل خاطئ tap switch	4	زيادة زمن وتكلفة الدورة الإنتاجية بإعادة توصيل الاسلاك بشكل صحيح	عدم النجاح في المرور من إختبار Test ratio	التجميع (assemply)
	test ratio &/or double voltage	36	3	3	عدم إزالة العازل (الورنيش) عند توصيل الاسلاك ب tap switch				
	no load losses	16	1	2	نقص في عدد شرائح الكور	8	زيادة زمن وتكلفة الدورة الإنتاجية بزيادة عدد الشرائح أو إحكام ضغطها	عدم النجاح في المرور من final test	
	load losses	64	2	4	عدم احكام وضغط شرائح الكور				
تركيب أجهزة احدث	اختبار الرطوبة بجهاز tan delta	180	6	3	بقاء الرطوبة في المحول نتيجة انقطاع الكهرباء في فترات خارج الدوام	10	إنهيار المحول قبل أقل من عمره الافتراضي	امتصاص الورق العازل للرطوبة	عملية تجفيف المحول في الفرن من الرطوبة قبل إغلاقه
		80	8	1	عدم ترك المحول المدة الكافية لاتمام عملية التجفيف				
طلب أجهزة قياس حرارة الزيت وهو داخل المحول	no control	200	10	2	عدم استبدال الفلاتر في الوقت المناسب	10	إنهيار المحول قبل أقل من عمره الافتراضي	بقاء بعض الشوائب في المحول	عملية تكرير الزيت وتسخينه
	tan delta	40	4	1	عدم إعطاء الوقت الكافي لعملية التسخين			وجود رطوبة في المحول	
		200	10	2	عدم تسخين الزيت قبل صبه الى درجة الحرارة المطلوبة (م70)				

جدول(2) النتائج المتحصل عليها بعد استخدام تقنية FMEA للمحول الكهربائي أثناء الصيانة

بالنظر الى جدول FMEA الذي تم تجهيزه عن طريق فريق العمل فإن أعلى قيمة للـ RPN كانت في عملية تكرير الزيت وتسخينه , حيث كان عدم إستبدال المصفيات (الفلاتر) في الوقت المناسب وعدم تسخين الزيت قبل صبه الى درجة الحرارة المطلوبة (70 مئوية) قد تحصّل على أعلى رقم وهو (200) وبالتالي فإن أولى أولويات التحسين في عملية الصيانة يجب أن تبدأ من هذه العملية (تكرير الزيت).

وتأتي في المقام الثاني من ناحية الخطورة عملية تجفيف المحول في الفرن من الرطوبة قبل إغلاقه , حيث أن بقاء الرطوبة في المحول نتيجة انقطاع الكهرباء في فترات خارج الدوام تكون هي السبب الرئيسي لعملية امتصاص الورق العازل للرطوبة والتي تسبب في إنهيار المحول قبل أقل من عمره الافتراضي, وقد تحصلت على قيمة RPN = 180 .

كذلك فإن الأخطاء التي تحصل في عملية حساب المعادلات الخاصة بالتصميم في عملية تصميم اللف للسلك والعازل تأتي في المرتبة الثالثة من ناحية الخطورة وقد تحصلت على قيمة RPN = 126 .
وكما هو واضح في الجدول فإن الأمر يتطلب إدراج العملية من ضمن العمليات الواجب تحسينها لتقليل أو إلغاء أخطار الإنهيارات التي يمكن أن تحصل أثناء عملية الصيانة , وكذلك تم إختيار سببين مع انهما يعتبران أقل أهمية من الأسباب التي تم ذكرها الى انه يجب وضعها في قائمة التحسينات الخاصة بعملية الصيانة :
السبب الأول هو وجود قطع في كوابل أجهزة الإختبار وهو من ضمن عملية إختبار Test ratio الخاص باللفات وكانت له قيمة RPN = 105 .
أما السبب الثاني فهو عدم إختيار السمك المناسب للورق العازل ويأتي ضمن عملية تصميم اللف للسلك والعازل وقد تم تسجيل قيمة RPN = 105.
وتم الإتفاق مع إدارة المصنع على عقد إجتماعات مستقبلية للجنة التي قامت بتجهيز جدول FMEA وذلك لتقييم الأداء والنظر في طرق وسبل تحسين العمليات المذكورة بعد التطبيق بفترة كافية, حيث نتوقع أن يتم تدارس التحسينات المفترضة وتطبيقها لفترة معينة من الزمن قد تستغرق 6 أشهر ثم بعدها يتم تجهيز جدول FMEA جديد يتم فيه تعبئة الخانات التي لم يتم تعبئتها في السابق بقيم RPN جديدة حيث يأمل الفريق أن تنخفض قيم RPN السابقة الى مستويات أقل.
أما فيما يخص المحولات العاملة في محطات التحويل فقد تم تجهيز جدول FMEA الخاص بها على النحو التالي:

Process / Function	Potential Failure Mode	Potential Effects of Failure	Severity	Potential Causes / Mechanisms of Failure	Current Design Controls Prevention	Occurrence	Detect	R.P.N.
اللفات	إحتراق اللفة , عطل أحد اللفات	توقف المحول عن أداء العمل	8	تحميل غير منتظم , عدم تساوي الاحمال على اللفات		4	5	160
	عطل كامل اللفات			إزدياد السحب من المحول		9	5	
tap switch	قطع أسلاك tap switch	توقف المحول عن العمل	8	حمل زائد على tap switch		6	9	432
خزان الزيت Body	تسريب الزيت من الخزان	مع مرور الوقت وزيادة التسريب يفقد الزيت مهامه (وظائفه)	3	تآكل الخزان بتأثير العوامل الخارجية	مراعات تركيب محولات بدون عيوب	2	1	6
				التعرض لعوامل بشرية (التخريب)				
		تحول (خروج) الكور من مكانه عند تسريب كبير للزيت	6			6	1	36
العوازل الخارجية	كسر العازل (الفازة)	حدوث (short) (التوصيل مع الجسم) حيث يحدث فصل في الكهرباء	8	عوامل بشرية , حدوث تشققات صغيرة تتحول الى شروخ صغيره	صيانة دورية , تنظيف	2	1	16
	تغيير يحصل لمادة العازل تجعله أكتر توصيل للكهرباء	حدوث (short) مع جسم المحول , قد يسبب فصل الكهرباء تلف لبعض مكونات المحول	8			3	2	48
	ترسب اتربة وغبار على جسم العازل	يصبح العازل موصل للكهرباء ويحدث (short)	8	التعرض للعوامل الجوية		4	3	96
الكور	تحول (خروج) الكور من مكانه مع إصدار صوت قوي	توقف المحول عن العمل	9	عطل في اللفات		4	1	36
				تفريغ للزيت بنسبة كبيرة يسبب بحدوث شرارة كبيرة	الصيانة الدورية , قياس مستوى الزيت في الخزان	5	1	

جدول(3) النتائج المتحصل عليها بعد استخدام تقنية FMEA للمحول الكهربائي أثناء العمل

و في هذا الجدول، تم ملاحظة أن قيمة RPN التي يتسبب بها الحمل الزائد على tap switch قد سجلت قيمة عالية جدا قياسا لقيم RPN التي تم تسجيلها لبقية أجزاء المحول أثناء العمل , وينتج عن هذا الحمل الزائد قطع أسلاك ال tap switch وتوقف المحول عن العمل , وقد تم تجهيز هذا الجدول (جدول FMEA

الخاص بالمحول أثناء العمل) بعد إجتماعات مطولة مع مهندسين وفنيين ومدراء لهم علاقة مباشرة بالمحولات.
وقد تم تسجيل قيمة RPN = 432 للسبب المذكور (الحمل الزائد على tap switch) مما يتطلب العناية الفورية بضرورة العمل على تخفيف الأحمال الزائدة عن المحولات عن طريق تشكيل فريق عمل يقترح طرق وأساليب لتخفيف الحمل الزائد وبالتالي تقليل قيمة الـRPN عن الرقم المذكور.
يأتي بعدها وبفارق كبير لقيمة الـ RPN سبب التحميل الغير المنتظم (عدم تساوي الأحمال على اللفات) وقد سجلت قيمة RPN=160 وهي تأتي في الترتيب الثاني من ناحية الأخطار التي تحصل للمحول أثناء العمل , حيث أن التحسين لتقليل الآثار الناتجة عن الاسباب المذكورة ينتج عنه انخفاض في قيمة RPN وبالتالي إطالة أعمار المحولات أثناء العمل وزيادة كفاءة منظومة التزويد بالكهرباء.

الإستنتاج Conclusion

بعد استعراض أهمية تطبيق أداة ال FMEA وهي إحدى أدوات إدارة الجودة للتنبؤ وتعريف كل الأخطار واحتمالات الفشل الخاصة بعمليات صيانة المحولات الكهربية وكذلك الأخطار وتوقعات الفشل للمحولات أثناء العمل بمحطات التحويل، تم استحداث فريقي عمل يشكل الباحثان عضوان في كلاهما أحدهما لتجهيز جدول FMEA خاص بعمليات صيانة المحولات داخل مركز الصيانة والآخر لتجهيز جدول FMEA يتم فيه تعريف وتحديد أنماط الفشل وأسبابها وتأثيراتها وشدتها وتكرارها وسهولة كشفها ثم تحديد أولويات اتخاذ الاجراءات الوقائية والعلاجية لمختلف قطع المحول تبعا لقيمة ال RPN المتحصل عليها لكل جزء من أجزاء المحول في العمل. وقد سهلت الجداول التي تم تجهيزها من تحديد أولويات اتخاذ قرارات تخص تحسين وتطوير عمليات الصيانة بمركز الصيانة وكذلك التركيز على سلامة قطع معينة في المحولات أثناء العمل حتى يتم إطالة عمر المحول وتقليل أعطاله وزيادة كفاءته، وقد تم اعتماد الجدولين كدليل لأعمال الصيانة للمحولات في مركز الصيانة وفي محطات التحويل لتحسين جودة الأداء. وقد أثبتت أداة ال FMEA أنها مناسبة وفعالة جدا في تحديد وتصنيف الاخطار وأنماط الفشل في الموقعين المذكورين وقد ارتاح فريق العمل التابع لشركة الكهرباء لتطبيق هذه الأداة وتم التجهيز لخطة تدريبية داخل الشركة وفي مركز الصيانة لتوسيع نطاق تطبيق هذه الأداة وكذلك دراسة استعمال أدوات أخرى من منهجية تحسين الجودة حتى يتم نشر ثقافة الجودة في مختلف المؤسسات الخدمية والصناعية.

References المراجع

1. A.Franzén and L.Bertling. State of the art life time modeling and management of transformers. Technical Report TRITA-EE 2007:041, KTH School of Electrical Engineering, August 2007.

2. Faisal KP, et al; Application of FMEA Method in a Manufacturing Organization focused on Quality. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 4, Issue 7, January 2015.

3. IEEE Guide for Reporting Failure Data for Power Transformers and Shunt Reactors on Electric Utility Power Systems. 1986.
4. Sabina Karlsson, A review of lifetime assessment of transformers and the use of Dissolved Gas Analysis, master thesis 2006-2007.
5. Mahmood Shafiee and Fateme Dinmohammadi, "An FMEA-Based Risk Assessment Approach for Wind Turbine Systems: A Comparative Study of Onshore and Offshore" 2014.)
6. Joseph Taylor and Jyoti K. Sinha, "FAILURE ANALYSIS OF GRIDCo SUBSTATION TRANSFORMER TO ENHANCE MAINTENANCE PERFORMANCE".
7. Jianpeng Bian*, Xiaoyun Sun, Jing Yang, "Failure Mode and Effect Analysis of Power Transformer Based on Cloud Model of Weight" 2015.

8. Mohsen Akbari, et al; "Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Power Transformers". 28th International Power System Conference.Tehran, Iran.November 2013.
9. Mohamed Mahmoud Abdel Fattah Khalil et al; "FMECA Analysis for the Assessing of Maintenance Activity for Power Transformers" 2014.
10. H.P. Berg, N. Fritze – RELIABILITY OF MAIN TRANSFORMERS RT&A # 01 (20) (Vol.2) 2011, March