دراسة أثر الزلازل على محطات تحويل الطاقة الكهربائية الهوائية

د. محمد زهيرة*

د. علاء الدين حسام الدين**

(تاريخ الإيداع 28 / 7 / 2020. قُبِل للنشر في 7/ 9 / 2020)

□ ملخّص □

بعد سلسلة الهزات الأرضية الضعيفة والمتوسطة التي ضربت القطر في الفترة الأخيرة وخصوصاً منطقة الساحل، تظهر الدراسات المرجعية القليلة جداً في هذا المجال أن الزلازل تسبب أضراراً كبيرة في محطات التحويل الهوائية، وخاصة على التوتر 400/220kV وهذه المحطات بنيت أول مرة في سورية عام *1988* في حلب وعدرا وحماه. ونظراً لعدم وجود أية دراسة لتجهيزات المحطات لدينا على الزلازل قبل عام *1997*، فإن المحطات السابقة غير مدروسة على الزلازل، لذلك لا بد من دراسة تأثير الزلازل على عناصر الشبكة الكهربائية لأن أي ضرر يحدث عليها أثناء الزلازل القوية يسبب انقطاع التيار الكهربائي، مما سينعكس سلباً على جميع القطاعات الأخرى وخاصة القطاع الطبي ومنظومات الإسعاف.

يهدف هذا البحث إلى تحديد نقاط الضعف في تجهيزات المحطات الكهربائية التي تتعرض لأكبر اجهاد كهربائي في حالة العمل الطبيعي، ومعرفة العلاقة بين الأضرار التي تحدث في هذه النقاط أثناء حدوث الزلازل وبين الإجهادات الدائمة المطبقة عليها، وتقديم المقترحات الضرورية للمهندس الإنشائي للحد من تراكم اجهادات الزلازل مع الإجهادات الكهربائية الدائمة

أظهر البحث أن أغلب الأضرار في التجهيزات أثناء حدوث زلزال تحدث عند النقاط التي تسود فيها أكبر إجهادات كهربائية نتيجة الحقل الكهربائي المطبق عليها في حالة العمل الطبيعي، ومن الضروري أن يقوم المهندس الإنشائي الدارس لحماية المحطة من الزلازل باستشارة اختصاصي في هذه التجهيزات، وآلية عملها.

الكلمات المفتاحية: الزلزال، محطات التحويل، إجهادات كهربائية، حقل كهربائي.

* **أستاذ – قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

** **أستاذ – قسم هندسة الميكاترونيكس – كلية الهندسة – جامعة المنارة – اللاذقية – سورية، www.manara.edu.sy.**

A Study the Effect of Earthquakes on Outdoor Power Substations

Dr. Mouhmmad Zhirha[*]
Dr. Alaa Eldin Housam Eldin[**]

(Received 28 / 7 / 2020. Accepted 7 / 9 / 2020)

□ ABSTRACT □

After a series of weak and moderate earthquakes that hit Syria recently; especially the coast, the very few reference studies in this field show that earthquakes leave significant damages to outdoor power substations, especially on tension 400/220kV. These stations were first built in the country in 1988 in Aleppo, Adra and Hama. Since there is no study of station equipment in Syria on earthquakes prior to 1997, the previous stations are not resilient to earthquakes. This is why it is necessary to study the impact of earthquakes on the elements of the electrical network because any damage that occurs during strong earthquakes causes a power outage, which will be reflected negatively on all other sectors, particularly the medical sector and emergency systems.

This research aims to identify the weaknesses in the installations of electrical stations that are subject to the greatest electrical stress in the case of normal work. In addition, to know the relationship between the damages that occur in these points during earthquakes and the permanent tensions applied to them. It also aims to provide the necessary proposals for the structural engineer to reduce the accumulation of earthquake tensions with permanent electrical stresses.

The research shows that most of the damage to the equipment during an earthquake occurs at the points where the largest electrical stresses prevail as a result of the electric field applied to it in the case of normal work. It is necessary for the structural engineer who studies to protect the station from earthquakes to consult a specialist in such equipment and their mechanism.

Keywords: earthquake, power substations, Electrical stresses, electric field.

[*] **Professor, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Electrical and Mechanical Engineering- Tishreen University, Lattakia, Syria.**

[**] **Professor, Department of Mechatronics, Faculty of Engineering, Manara University, Lattakia, Syria, www.manara.edu.sy.**

مقدمة:

بعد سلسلة الهزات الأرضية الضعيفة والمتوسطة التي ضربت القطر في الفترة الأخيرة وخصوصاً منطقة الساحل تبادر للذهن ما هو أثر زلزال قوي على الشبكة الكهربائية والتي في حال تدميرها أو تضررها سوف تتأثر جميع مناحي الحياة الأخرى.

وقد بيّنت دراسة إحصائية أن أغلب الأضرار التي تحدث على تجهيزات محطات التحويل الهوائية تحدث في النقاط التي تسود فيها اجهادات كهربائية كبيرة نتيجة شدة الحقل الكهربائي المطبق عليها وخاصة في القطب الأرضي لعوازل العبور وعلى أقطاب عوازل الاستناد البورسلانية.

تتضمن أغلب الكودات الوطنية والعالمية في مجال الزلازل متطلبات وشروط تصميم المباني في المحطات الكهربائية لتجنب الخسائر المادية والبشرية الناتجة عن الزلازل، وقد لحظ الكود العربي السوري الملحق (*2*) تصميم وتحقيق المباني والمنشآت لمقاومة الزلازل الصادر عام *2005* [1]، بعض أنواع المخمدات التي تستخدم في تثبيت التجهيزات الكهربائية داخل المباني بدون أخذ القوى الخاصة التي تحدث على تجهيزات المحطات الهوائية بالحسبان، وهذه التجهيزات تكون عالية في الارتفاع وغالباً ضيقة في أبعاد مسقطها الأفقي مما يعرضها للانقلاب أو تكسر العوازل البورسلانية الهشة البنية المستخدمة فيها نتيجة اجهادات الانحناء التي تتعرض لها بسبب الزلازل.

أهمية البحث وأهدافه:

أهمية البحث:

تتجلى أهمية البحث بالتأكيد على أن أغلب تجهيزات المحطات في القطر العربي السوري غير مدروسة على الزلازل، وقد تم البدء بدراسة المنشآت والمباني على تحمل الزلازل بعد عام 1997 وخاصة بعد إصدار الكود العربي السوري.

مجال البحث:

سيركز البحث على النقاط التالية:

1. تحديد أهم الأعطال التي أصابت المحطات الكهربائية التي تعرضت لزلازل.
2. تحديد أسباب حدوث هذه الأعطال عند حدوث زلزال.
3. تحديد النقاط التي تعرضت لأكثر الأضرار التي أصابت التجهيزات نتيجة الزلازل.

أهداف البحث:

يهدف البحث إلى تحديد نقاط ضعف نظام الطاقة الكهربائية وخاصة تجهيزات محطات التحويل الهوائية للتوترات 400/220 kV و220/66 kV وذلك من خلال البحث عن سبب تركز الأضرار نتيجة الزلازل في النقاط التي تسود فيها أكبر شدات حقل كهربائي في حالة العمل الطبيعي.

مفاهيم أساسية:

الزلازل ظاهرة طبيعية عبارة عن هزات أرضية بتسارع كبير ناتجة عن انفراغ كمية كبيرة من الطاقة في باطن الأرض. وتقاس شدة الزلازل بمقياسين:

الأول: مقياس ريختر (نسبة للعالم الأمريكي *Charles Francis Richter*) أستاذ علم الزلازل في جامعة كاليفورنيا، الذي اقترح عام *1935* مقياس لشدة الزلازل تبدأ بالرقم 1 وتنتهي بالرقم 9، وهو مقياس لوغاريتمي حيث كل درجة تشير إلى شدة الموجه تزيد عشرة أضعاف عن سابقتها. أي أن شدة الزلزال ذي الدرجة 7أكبر بـ *10* مرات من الدرجة

6 وأكبر بـ *100* مرة من الدرجة *5*. (أقوى زلزال تم رصده حتى الآن هو زلزال ألاسكا كان بقوة *8.6* على مقياس ريختر وحدث في *27* آذار عام *1963*) [2]. وبالنسبة لمقدار الطاقة المنطلقة، فإن الزلزال الذي قوته 7 على مقياس ريختر تنطلق منه طاقة تساوي 32 مرة أكثر من الزلزال الذي قوته 6، و 1000 مرة من طاقة الزلزال الذي درجته 5.

الثاني: مقياس ميركالي (نسبة للعالم الإيطالي *Giuseppe Mercalli*) *1902* هو مقياس لتقييم ووصف شدة ما تحدثه الزلازل من تأثيرات مختلفة في الأماكن المختلفة حول مركز حدوث الزلازل، ويتألف من *12* درجة، ويعتمد على مقدار الدمار الذي يحدثه الزلزال، ومدى إحساس الناس به، ولا يعبر عن قوة الزلزال، وفق الجدول التالي:

مسلسل	وصف ما يحدثه الزلزال حسب مقياس ميركالي	قوة الزلزال حسب مقياس ريختر
1	لا يمكن الإحساس بالهزة إلا بجهاز.	2.0
2	يشعر بها أناس قليلون.	3.5
3	يشعر بها الناس داخل المنازل وكأن شاحنة ضخمة مرت بقربه.	4.2
4	يشعر بها الناس ويستيقظ النائم، ويهتز زجاج النوافذ.	4.3
5	يتكسر العديد من الزجاج والأواني.	4.8
6	يشعر الناس بالهزة جيداً وتتكسر الأشجار.	4.9-5.4
7	تقع وتتهدم المنازل القديمة والرديئة في بنائها.	5.5-6.1
8	تتصدع المنازل قوية البناء وتتقلب السيارات.	6.2
9	تهتز المنازل القوية وتتصدع الأرض، وتتكسر أنابيب المياه، وتقع بعض المنازل.	6.9
10	تتشقق الأرض، تتهدم الجسور والطرق المعبدة، تحدث انزلاقات أرضية.	7-7.3
11	تتهدم معظم المباني وتقذف الأجسام إلى الفضاء.	7.4-8.1
12	تهدم شامل وكوارث رهيبة.	8.1-8.9

المناطق الزلزالية

قسم الكود العربي السوري [1] القطر إلى 6 مناطق زلزالية اعتماداً على احتمال تعرضها للأخطار الزلزالية، وهذا يتوافق مع *DIN-VDE 100 teil 300* لعام *1996-01* [3] الذي صنف شدة الزلزال في أربع مستويات وفق الجدول (1) :

الجدول (1) تصنيف الزلازل وفق [3].

الرمز	تصنيف الزلزال	قوة الزلزال
AP1	مهمل	التسارع الزلزالي $\leq 30\ cm/s^2$
AP2	ضعيف القوة	$30\ cm/s^2 \leq$ التسارع الزلزالي $\leq 300\ cm/s^2$
AP3	متوسط القوة	$300\ cm/s^2 \leq$ التسارع الزلزالي $\leq 600\ cm/s^2$
AP4	قوي جداً	التسارع الزلزالي $> 600\ cm/s^2$

ووفق جدول التسارعات الأرضية المحتملة لأهم مراكز المدن والبلدات في سوريا الواردة في الكود العربي السوري تتراوح قيم التسارع الزلزالي بين $75\ cm/s^2$ و$300-400\ cm/s^2$ أي في المنطقة الزلزالية الثانية أو الثالثة لذلك تحدد وزارة الكهرباء عند الإعلان عن بناء المحطات أن الأبنية والمنشآت يجب أن تحقق شروط ومتطلبات الحماية من الزلزال من الدرجة الثالثة ويؤخذ التسارع الزلزالي في هذه الحالة $300cm/s^2$.

5. دراسة الأعطال التي حدثت على محطات تحويل الطاقة الكهربائية الهوائية وفق المراجع العلمية:

لا توجد دراسة تجريبية مباشرة حول الموضوع، فقط تمت دراسات إحصائية عالمية، وبيّنت دراسة إحصائية موضوع أطروحة دكتوراه في جامعة كوبي اليابانية *2007* لدراسة أثر *48* زلزال في بلدان العالم المختلفة على التجهيزات الكهربائية[4]، وخلصت الدراسة إلى ما يلي:

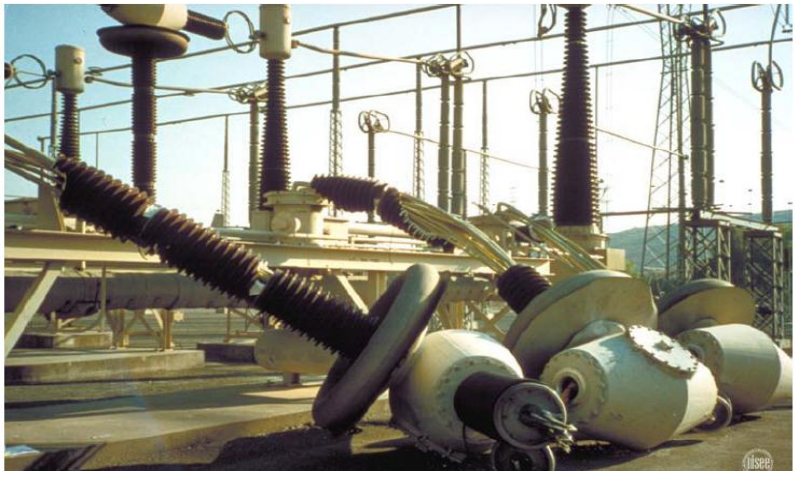
- ❖ الخطر الأكبر للزلزال يصيب محطات الطاقة الهوائية 400/220 kV .
- ❖ كلما ارتفع التوتر الاسمي للتجهيزات كلما كانت معرضة أكثر لخطر الزلزال.

وبينت الدراسة أن أغلب الأعطال التي حدثت هي:

- ✓ تحطم العوازل البورسلانية (عوازل الاستناد)، وكانت التجهيزات القديمة أكثر عرضة للأضرار من التجهيزات الحديثة.
- ✓ أعطال في المحولات مثل تسرب الزيت و/أو انقلابها من القاعدة.
- ✓ سقوط بعض أعمدة التوتر العالي نتيجة انجراف في التربة، وبعض الانهيارات الأرضية.

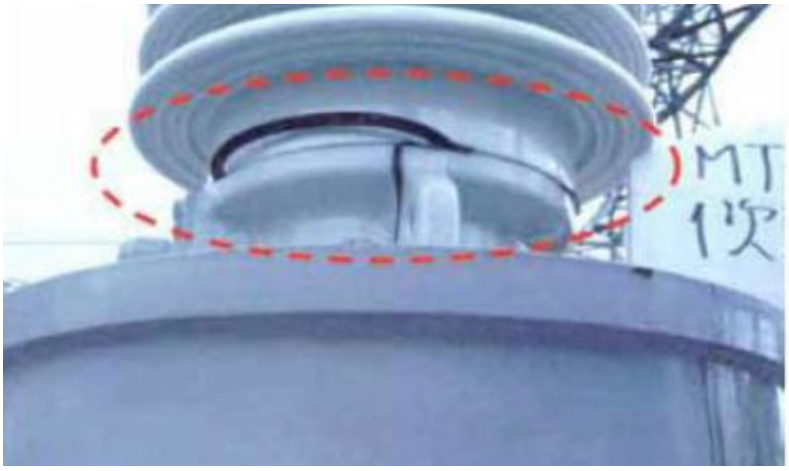
سوف نبين الأعطال التي حدثت في محطات الطاقة الكهربائية في ثلاث حالات كانت شدة الزلزال فيها أكبر من *6* درجات على مقياس ريختر:

- ❖ **زلزال كاليفورنيا عام 1994 (M=6.7على مقياس ريختر).**



الشكل (1) تحطم أقطاب التوتر العالي لقاطع استطاعة معزول بغاز *SF6* (*400kV*)

الشكل (2) تحطم البورسلان في محول (*400/220kV*)

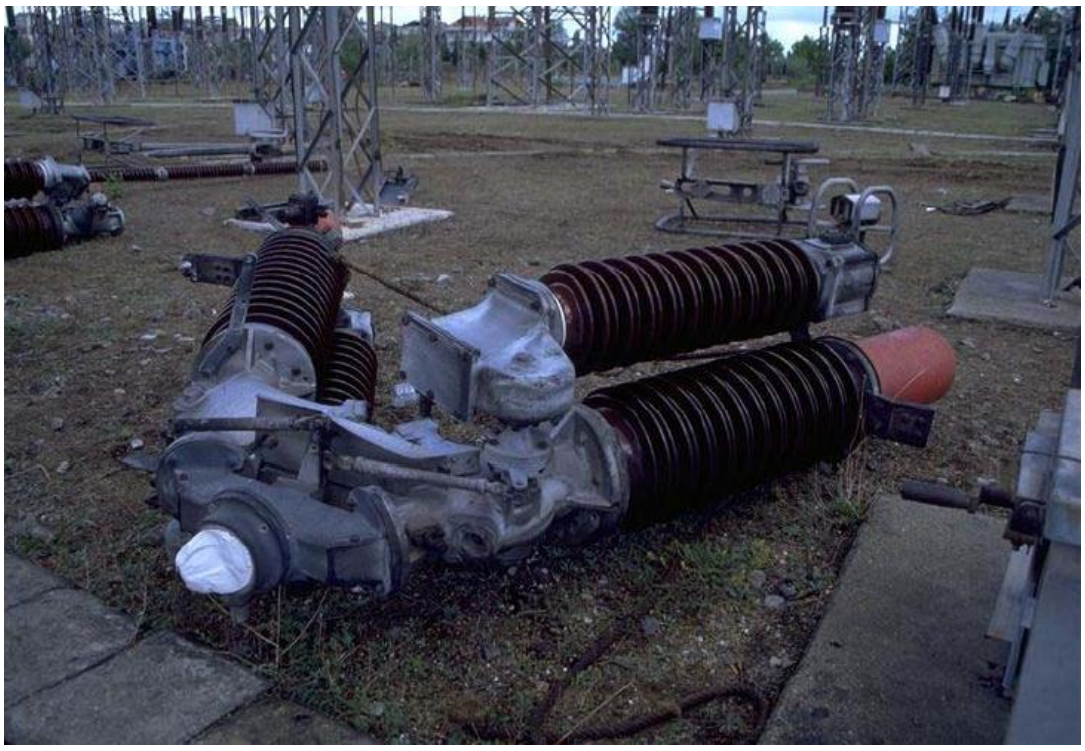


الشكل (3) تسرب الزيت في المحولات (400/220kV) نتيجة خروج جوانات العزل من مكانها في القطب الأرضي لعازل العبور (مكان التحديد).

❖ **زلزال *Kocaeli* (تركيا عام *1994*) (*M=7.4* على مقياس ريختر).**

حدث في هذا الزلزال:

- ✓ انهيار العوازل البورسلانية لقاطع الاستطاعة (*400kV*) (تحطم البورسلان)، الشكل (4).
- ✓ في المنطقة القريبة من بؤرة الزلزال تعرضت أغلب محولات الاستطاعة *400kV* للضرر.
- ✓ حدوث تعتيم عام لمدة *36* ساعة في كامل تركيا، والذي ساعد على عودة التيار بسرعة هو توفر قطع التبديل في المستودعات.
- ✓ لم يلاحظ أي أعطال تذكر من جهة *66kV* في محطات التحويل *220/66kV*.
- ✓ سقوط عدد من أبراج التوتر العالي نتيجة انجراف التربة والانهيارات الأرضية بالقرب من بؤرة الزلزال.



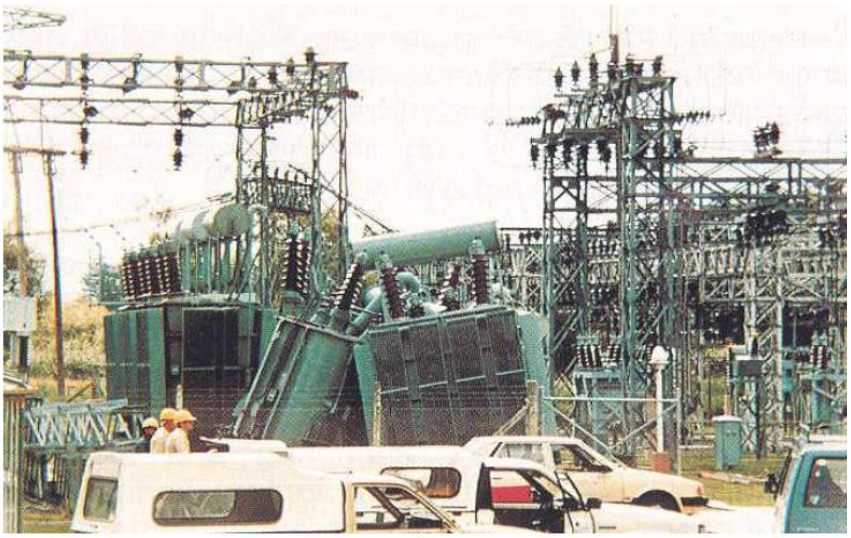
الشكل (4) تحطم قطب التوتر العالي لقاطع الاستطاعة.

❖ **زلزال *Edgecumbe* (نيوزلندا عام *1967*) (*M=6.3* على مقياس ريختر).**

حدث في هذا الزلزال:

- ✓ سقوط بعض اللوحات في صالة القيادة والتحكم، الشكل (5).
- ✓ انقلاب عدد من المحولات، الشكل (6).
- ✓ خروج قواعد المحولات المثبتة على سكة حديد من أماكنها، الشكل (7).

الشكل (5) سقوط بعض اللوحات الكهربائية في صالة القيادة والتحكم.



الشكل (6) انقلاب عدد من المحولات عن قواعدها.

الشكل (7) خروج قواعد المحولات عن سكة التثبيت

من الدراسة السابقة [4] نجد أن أعطال التجهيزات نتيجة الزلزال تحدث في النقاط التي ستسود فيها أكبر شدة للاجهادات الكهربائية. ففي عوازل البورسلان التي تركب عليها التجهيزات تسود شدة حقل كبيرة جداً بالقرب من الأقطاب (حقل مدبب–مدبب)، وبالتالي تكون الاجهادات الكهربائية في هذه النقاط في حالة العمل الطبيعي أكبر ما يمكن.

ونلاحظ ايضاً أن الأعطال في المحولات تتركز بالقرب من القطب الأرضي لعازل العبور، وفي هذه النقطة تسود أكبر شدة حقل كهربائية، وبالتالي تكون الاجهادات الكهربائية كبيرة جداً.

هنا يتم طرح السؤالين التاليين:

- ✓ هل الأضرار التي حدثت في البلدان الأخرى يمكن ان تحدث عندنا أيضاً؟
- ✓ هل التجهيزات الكهربائية المتضررة وفق الدراسة السابقة مدروسة بشكل جيد لمقاومة الزلازل؟

بالنسبة للسؤال الأول:

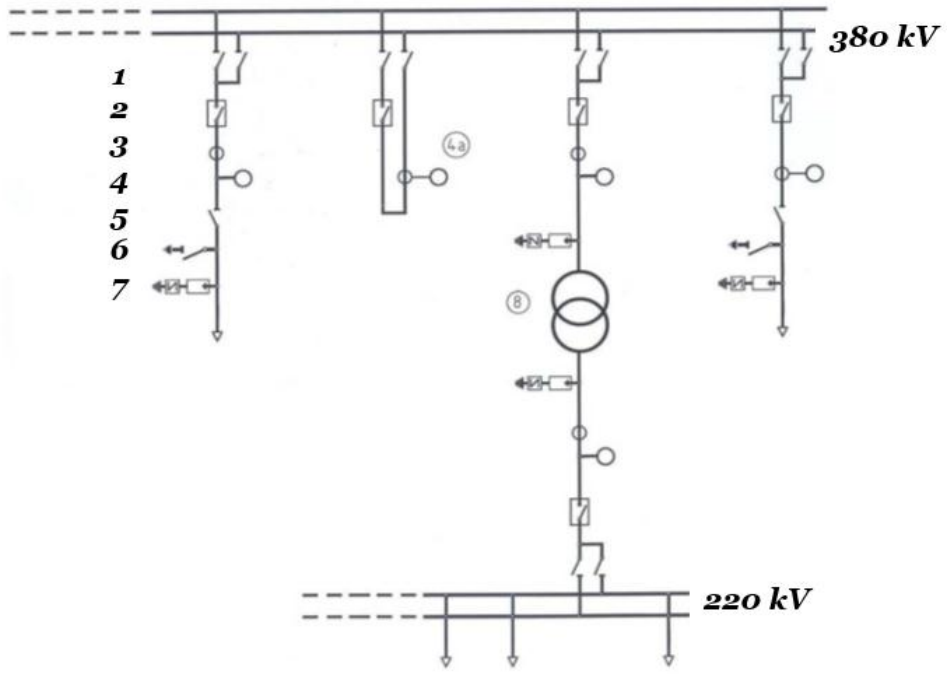
الشركات التي تصنع تجهيزات محطات التوتر العالي محدودة ومعروفة عالمياً (سيمنس، *ABB*، هيتاشي...الخ)، وتورد هذه التجهيزات لجميع دول العالم، لذلك يمكن القول إن تجهيزات المحطات متشابهة، وبالتالي يمكن أن تحدث نفس الأضرار في بلدنا.

بالنسبة للسؤال الثاني:

باعتبار أن شدة الزلزال والتسارع الأرضي الناتج عنه غير معروفين مسبقاً، توجد صعوبة في تحديد قيمة الاجهادات التي تحدث على عوازل الاستناد، أو عوازل العبور للمحولات. فقط في السنوات الأخيرة أصبحت بعض الشركات تصنع التجهيزات وفق شدة المنطقة الزلزالية (حسب طلب الزبائن، وبأسعار خاصة) مثل زيادة المتانة الميكانيكية للبورسلان المستخدم وزيادة استخدام العوازل المطاطية لتقليل الكتلة الكبيرة لعوازل الاستناد وعوازل العبور، بالإضافة إلى زيادة في استخدام العوازل المعزولة بغاز *SF6*، وبالتالي التقليل من طول العوازل (كتلة العازل) [5].

التجهيزات المستخدمة في محطات التحويل الهوائية:

يبين الشكل (8) العناصر الكهربائية لمحطة تحويل *380/220kV* (لطور واحد).



1- قاطع البارات 2-قاطع الاستطاعة 3-محول تيار 4-محول توتر 4a-أجهزة قياس للتوتر والتيار 5 قاطع لفصل النواقل 6-قاطع تأريض 7-مفرغات توتر 8-محول استطاعة

الشكل (8) العناصر الكهربائية لمحطة تحويل 380/220kV (لطور واحد)

تربط المفرغات ومحولات التوتر والتيار وقواطع الاستطاعة (للطور الواحد) مع بعضها البعض وتوضع هذه التجهيزات على مساند معدنية (الشكل 9)، وذلك لتحسين توزيع الحقل الكهربائي وتحويله إلى حقل (مدبب-مدبب) بدلاً من حقل (مدبب-صفيحة) في حال استنادها على الأرض، وبالتالي التخفيف من شدة الحقل (الإجهادات الكهربائية) على قطب التوتر العالي، بالإضافة إلى التخلص من رطوبة الأرض.

ويجب أن يكون ارتفاع أقطاب التوتر العالي عن الأرض كافياً، بحيث لا يحدث قصر مع الأرض، وأن يستطيع العامل التحرك بسهولة في أرض المحطة، بحيث لا تشكل شدة الحقل الكهربائية خطراً على حياته.

الشكل (9) رفع التجهيزات على مساند معدنية

وتحدد المواصفات القياسية هذه الارتفاعات كما في الجدول (2) [5]:

الجدول (2) المسافة المطلوبة بين أقطاب التوتر والأرض.

قيمة التوتر [kV]	المسافة بين قطب التوتر العالي والأرض [cm]
400	*605*
220	*445*
66	*300*

يزيد وضع التجهيزات على مساند معدنية من ارتفاعها عن الأرض، وتكون القاعدة التي ترتكز عليها ضيقة، كما هو واضح من الشكل (9). وبما أن القوة الأفقية الناتجة عن الزلازل تتركز في مركز ثقل الجسم فكلما كان ارتفاع الجسم أكبر كلما كان مركزه ثقله أعلى، وذراع القوة أكبر، وبالتالي عزم الفتل أكبر، ولهذا تكون التجهيزات ذات الارتفاعات الكبيرة أكثر عرضة للانقلاب من التجهيزات ذات الارتفاعات الأقل، وهذا يفسر سبب تعرض تجهيزات التوترات العالية إلى أضرار كبيرة نتيجة الزلازل أكثر من تجهيزات التوتر المتوسط.

أسباب حدوث الأعطال عند الزلزال:

يعود السبب الرئيس لهذه الأعطال إلى[5]:

1. قوى العطالة نتيجة التسارع الزلزالي الأرضي:

يبين الجدول (3) قيمة التسارع الزلزالي بـ cm/s^2 الذي يسبب الأضرار على التجهيزات الكهربائية.

الجدول (3) قيم التسارع الزلزالي الذي يسبب أضرار على التجهيزات الكهربائية [5].

التجهيزات	التوتر [kV]		
	400	220	60
قاطع هوائي	50	100	200-300
محول تيار	100	200-350	500
مفرغ توتر	100	200-350	700
قاطع استطاعة	400	500	770
محولات	150	150	150
بارات	200	200-350	750

نلاحظ من الجدول السابق ما يلي:

❖ كلما ارتفع توتر العمل تكون التجهيزات معرضة لخطر الزلازل عند تسارع زلزالي صغير، باستثناء المحولات التي تتعرض للضرر عند تسارع زلزالي ثابت $150\ cm/s^2$. وأغلب الأعطال في المحولات عند هذا التسارع الزلزالي هو انقلابها من قواعدها [6].

❖ قيم التسارع الزلزالي في أغلب مناطق القطر وفق ما هو وارد في الكود العربي السوري أكبر من قيمة التسارع الزلزالي التي تسبب الأضرار على تجهيزات محطات *220kV* و*400kV*. في حين لا يؤثر الزلزال على تجهيزات محطات 66/20kV، ويكفي في هذه المحطات أخذ الملاحظات الواردة في الكود العربي السوري فقط.

قوى داخلية نتيجة التردد الذاتي (تباعد التجهيزات عن بعضها) للتجهيزات المربوطة مع بعضها البعض (مفرغات التوتر – محولات القياس – القاطع...) بواسطة ناقل طور مشدود (الشكل 10).

الشكل (10) ربط تجهيزات المحطة (لطور واحد) مع بعضها البعض

ويبين الجدول (4) قيم التردد الذاتي للتجهيزات الكهربائية نتيجة التسارع الزلزالي الأرضي:

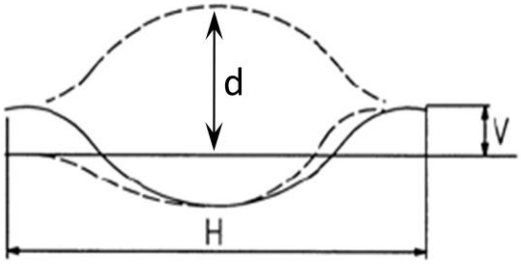
الجدول (*4*) التردد الذاتي لتجهيزات المحطات.

التجهيزات	التردد [*Hz*]
قواطع استطاعة	2
محولات القياس	2
عوازل الاستناد للقواطع الهوائية	3
مفرغات التوتر	4
المحولات	4-6

نتيجة الترددات الذاتية المختلفة للتجهيزات في المحطة سوف يحدث تباعد فيما بينها أثناء الزلزال، إذ يختلف التردد الذاتي لعناصر المحولة من عنصر لآخر، فمثلاً في محولات *400kV* يكون التردد الذاتي لجسم المحولة مساو *5 [Hz]*، والتردد الذاتي لعازل العبور *7[Hz]*، وهذا يسبب تباعد مختلف. ويكون التردد الذاتي للأجهزة ذات العوازل المطاطية أقل، ويبلغ *1.2 [Hz]*، ويرجع ذلك إلى انخفاض كتلة العوازل البلاستيكية بالمقارنة مع العوازل البورسلانية نتيجة انخفاض الصلابة. ونتيجة اهتزاز التجهيزات سوف تنشأ أيضاً قوى تسبب اهتزاز هذه لنواقل، وبالتالي انقطاع الناقل أو انقلاب العناصر التي لم تكن لتنقلب بدون هذا الربط.

ويعطى مطال الاهتزاز d للناقل في الشكل (11) بالعلاقة:

$$d = \sqrt{\frac{3}{8} \cdot \Delta \cdot H}$$



الشكل (11) اهتزاز ناقل الطور

حيث:

H – أقصر مسافة بين التجهيزات المتتالية.

Δ– الانزياح الأعظمي للتجهيزات أثناء الزلزال، وتتعلق بالتردد الذاتي لها وفق الجدول (5):

الجدول (5) قيم الانزياح الأعظمي وفقاً للتردد الذاتي للتجهيزات.

التردد الذاتي للتجهيزات [Hz]	1.5 Δ[mm]
2-2	140
2-3	111
2-4	103
3-3	70
3-4	55

وتعطى قيم d بـ mm بدلالة الانزياح Δ والمسافة بين التجهيزات وفق الجدول (6):

الجدول (6) قيم المسافة d بدلالة الانزياح الأعظمي Δ والمسافة بين التجهيزات.

المسافة *[m]*	*Δ [mm]*			
	30	*60*	*120*	*200*
1.5	*130*	*185*	*260*	*335*
3	*185*	*260*	*365*	*475*
4.5	*225*	*320*	*450*	*580*
6	*260*	*365*	*520*	*670*

ملاحظات:

1. عندما يكون الناقل الذي يصل بين التجهيزات غير مرن، كما في الشكل(10)، ونتيجة اختلاف التردد الذاتي للتجهيزات سوف يصبح الناقل مشدود، وبالتالي تحدث قوى انحناء كبيرة على البورسلان تؤدي إلى تحطيمه، في حين أن العوازل المطاطية تتحمل هذه الاجهادات.

2. يمكن نتيجة الزلزال حدوث قصر بين الأطوار، وبين طور والأرض، والقوى الناتجة عن تيار القصر تسبب قوى انحناء كبيرة في قاعدة عازل الاستناد.

لذلك لفصل تأثير الزلازل لكل عنصر من العناصر الأخرى يفضل أن تكون هذه النواقل ذات طول كاف.

تعطى قيمة الاجهاد الأعظمي المطبق على العازل الاسطواني عند الأقطاب بالعلاقة:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I} \cdot r$$

حيث:

σ_{max}– الاجهاد الأعظمي المطبق على العازل بالقرب من الأقطاب [MPa].

M– عزم الانحناء الأعظمي [kN.m].

I– عزم عطالة مقطع العازل [mm^4].

r– نصف قطر العازل [mm].

ويجب الأخذ بالحسبان أنه على أقطاب العازل (نقطة تركيب القبعة المعدنية) على البورسلان تسود شدة حقل كهربائي كبيرة جداً نتيجة تركز خطوط الحقل في هذه النقاط (حقل مدبب–مدبب)، وبالتالي تكون الاجهادات الكهربائية في الحالة العادية أكبر ما يمكن في هذه النقاط، في حين تكون هذه الاجهادات أقل ما يمكن في منتصف العازل.

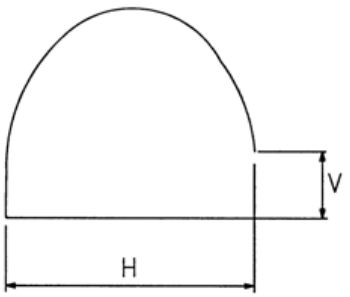
ومن جهة ثانية يسبب عدم تركيب الأقطاب المعدنية (القبعة) مع البورسلان بشكل متمحور (جميع المحاور على استقامة واحدة) للأقطاب وللبورسلان لا مركزية طارئة وتوزيع غير منتظم للإجهادات، وبالتالي تحطم البورسلان تحت تأثير قوة أقل.

يعطى الحد الأدنى لطول الناقل الذي يصل بين التجهيزات l_0 بالعلاقة:

$$l_0 = H_1 + 1.5\Delta + l_2$$

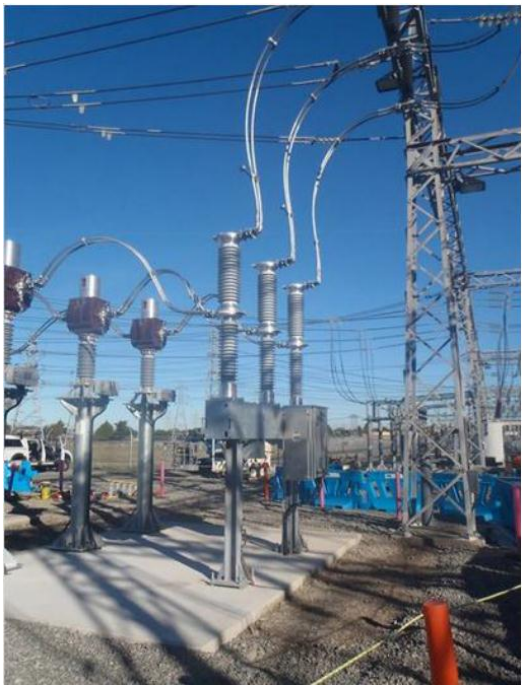
حيث: H_1 – أقصر مسافة بين نقاط الوصل.

l_2 – طول إضافي يتعلق ببنية الناقل، وقدرته على الانحناء، وينفذ كما في الشكل (12).



الشكل (12) الطول الإضافي للناقل

يبين الشكل (13) كيفية الوصل بين التجهيزات المتجاورة بحيث يكون الناقل فضفافاً، وذلك وفق ما هو وارد في الشكل (12).



الشكل (13) كيفية الوصل بين التجهيزات المتجاورة.

عندما يتوقع حدوث انزياح نسبي كبير، وتتزايد القوى المطبقة على الناقل ببطئ، وتتعلق هذه القوى بقدرة الناقل على الانحناء يكون من المناسب تنفيذ الوصل كما في الشكل (14)، ويمثل هذا الربط أبسط الأشكال والأكثر استخداماً في الربط، وفي هذه الحالة يكون حساب التدلي d أثناء الاهتزاز ضروري. في هذه الحالة تكون الأجهزة مستقلة عن بعضها البعض، ولا يلعب اختلاف التردد الذاتي أي دور.

الشكل (14) تنفيذ الوصل عند حدوث انزياح نسبي كبير وتزايد القوى المطبقة على النواقل.

بسبب قوى العطالة نتيجة التصادم الذي يحدث على القاعدة المرنة، وهذا يسبب تشقق المواد البلاستيكية المستخدمة للتخميد في القواعد، وبالتالي انقلاب التجهيزات المرتفعة.

ولتدارك الأخطار التي يمكن أن تتعرض لها التجهيزات الكهربائية بأنواعها كافة لا بد من تصميم قواعد هذه التجهيزات، ومعدات تثبيت التجهيزات على هذه القواعد لتحمل قوى جانبية أفقية. بالإضافة إلى القوى الناتجة عن الحمولات الشاقولية. وتحسب هذه القوى بالعلاقة:

$$\vec{F}_1 = \frac{W}{g} \cdot a$$

حيث:

W – القوى الناتجة عن الحمولات الشاقولية.

g – تسارع الجاذبية الأرضية ($981\ cm/s^2$).

a – التسارع المتوقع الناتج عن الزلازل.

وتطبق هذه القوة في مركز ثقل التجهيزات المطلوبة، وتصمم القاعدة لمقاومة عزم الانقلاب الذي يمكن أن ينتج عن هذه القوة، وقوى القص القاعدية المطبقة على براغي تثبيت التجهيزات على القواعد. أما بالنسبة لعوازل البورسلان الحاملة لنواقل التوتر العالي فيجب أن تصمم لتحمل قوة إضافية ناتج عن الزلازل مقدارها F_2 بالإضافة إلى جميع الحمولات الستاتيكية الأخرى، وتحسب أيضاً بنفس العلاقة السابقة باعتبار W هي الحمولات الستاتيكية التي يتعرض لها العازل. وبالنسبة لأبراج التوتر العالي فتحسب لمقاومة العزم الناتج عن قوى أفقية مطبقة في نقاط تعليق العوازل على العوارض المعدنية، وتحسب بنفس العلاقة السابقة باعتبار W هي الحمولات الستاتيكية التي يتعرض لها كل عازل.

مما سبق لاحظنا الترابط الكبير بين مكان حدوث الضرر نتيجة الزلازل، والمكان الذي تسود فيه أكبر شدة حقل كهربائي (الاجهادات الكهربائية) في حالة العمل الطبيعي، لذلك يجب دراسة حماية هذه التجهيزات من الزلزال من قبل مختصين، وذلك بالتعاون مع مختصين في مجال الطاقة الكهربائية. أيضاً يوجد ترابط كبير بين كتلة التجهيزات، والأضرار التي تحدث عليها. لذلك أصبحت الشركات الكبرى المصنعة لتجهيزات المحطات الكهربائية تأخذ أثر الزلزال عليها، وتصمم هذه التجهيزات لتناسب المناطق الزلزالية المختلفة من خلال:

- استخدام غاز $SF6$ بالعزل بدلاً من الهواء، وبالتالي حجم وكتلة التجهيزات تكون أقل (المحطات المغلقة).
- استخدام العوازل المطاطية المقاومة للزلزال بدلاً من العوازل البورسلانية.
- تصميم جميع القواطع المختلفة في المحطة بحيث تناسب منطقة زلزالية من الدرجة الثانية (تسارع أرضي (0.3 g m/s^2، g تسارع الجاذبية الأرضية $9.89m/s^2$).
- تصميم عناصر المحولات $380/220kV$ (النواة – الملفات – عوازل العبور) وفق طلب الزبائن، وبشكل خاص غير الأوربيين، وبكلفة مالية كبيرة.

وللحد من الأضرار الناتجة عن الزلازل على تجهيزات المحطات، وخاصة التجهيزات المنفذة سابقاً، والتي لم تدرس على الزلازل، وبناء على الأضرار الأكثر شيوعاً لتجهيزات المحطات يجب التأكد من قدرة هذه التجهيزات على تحمل الإجهادات الناتجة عن الزلازل كماً ونوعاً وفق الآتي:

أ. المحولات:

✓ تقدير التردد الذاتي f_0 لاهتزاز عناصر المحول وتأثيرها على القاعدة، وبالتالي يمكن تقدير الحد الأقصى للتباعد الذي تتحمله عناصر المحول وفق قوة الزلزال.

✓ يجب التأكد من وجود مثبتات يمكنها امتصاص قوى الشد العمودية، وكذلك القوى الأفقية المطبقة على المحولة. وفي حال عدم وجود هذه المثبتات لا بد من التأكد من عدم انقلاب المحول أو تدحرجه من مكانه، كذلك يجب التأكد من أن صلابة التثبيت كافية.

✓ يجب التأكد من وجود طول إضافي كافٍ للناقل الذي يصل بين قطب التوتر العالي لعازل عبور المحول والتجهيزات الأخرى عند اهتزاز عوازل عبور المحول، ويجب تنفيذ هذه الوصلات كما هو وارد سابقاً.

✓ التأكد من تثبيت قاعدة عازل العبور في المحول على الهيكل بشكل جيد وصحيح، ويجب أن تكون جوانات خزان الزيت كتيمة.

✓ التأكد من أن المساند التي يرتكز عليها خزان الزيت، وأنابيب التبريد كافية.

ب. قواطع الاستطاعة والقواطع الهوائية ومحولات التوتر والتيار:

✓ تقدير التردد الذاتي f_0 لاهتزاز هذه العناصر، وبالتالي التباعد الأفقي بينها.

✓ يجب التأكد من أن تكون مقاومة التثبيت كافية لتحمل الإجهادات الناتجة عن الزلازل.

✓ التأكد من أن النواقل التي تصل بين هذه التجهيزات تملك الطول الكافي أثناء تباعد التجهيزات بدون أن تصبح مشدودة تسبب اجهادات انحناء على قواعد عوازل البورسلان المثبتة على قواعد غير عريضة من الحديد المغلفن.

ج. الأنظمة الثانوية:

✓ يجب دراسة المبنى (صالة القيادة والتحكم) على تحمل الاجهادات، ويجب التأكد من أن الأرضيات المرتفعة التي تحوي خزائن التحكم أو البطاريات مؤمنة ضد الانهيار وضد السقوط. والتأكد من عدم وجود احتمال لاصطدام علب البطاريات مع بعضها البعض.

✓ التأكد من تثبيت خزائن التحكم بشكل جيد ضد الانقلاب.

الحد من الزلازل في مجال التوتر المنخفض والمتوسط:

❖ يجب أن تمدد النواقل بين النقاط المتجاورة بحيث يكون لديها الطول الكافي (حوالي $10cm$) للتجاوب مع اهتزاز الجدران بدون أن تنقطع.

❖ الحفاظ على مسافة كافية بين الأشجار ونواقل الشبكة بحيث لا يسبب سقوط الأشجار انقطاع خطوط التوتر.

❖ تركيب أنظمة حماية من توتر القصر والتوترات الزائدة بحيث يحدث فصل جزئي وليس كامل النظام.

❖ اتباع التعليمات الواردة في الكود العربي السوري [1] للحماية من الزلازل في تثبيت هذه التجهيزات داخل المنازل.

النتائج والمناقشة:

1. بينت هذه الدراسة أن الزلازل تسبب أضراراً كبيرة في محطات التحويل الهوائية، وخاصة على التوتر 400/220kV وهذه المحطات بنيت أول مرة في القطر عام 1988 في حلب وعدرا وحماه.

2. لم يكن هناك أية دراسة لتجهيزات المحطات في القطر على الزلازل قبل عام *1997*، وتم بعد هذا التاريخ الاستعانة ببعض المختصين في هذا المجال عند دراسة قواعد التجهيزات والأبنية بدون أخذ التجهيزات نفسها بالحسبان (قواطع، مفرغات توتر، محولات قياس ...الخ). وهذا يعني أن المحطات السابقة غير مدروسة على الزلازل.

3. أكثر الأضرار التي أصابت التجهيزات نتيجة الزلازل تسود في النقاط التي تتركز فيها أكبر شدة حقل كهربائي (اجهادات كهربائية دائمة).

4. يلعب حجم التجهيزات دوراً أساسياً في الأضرار نتيجة الزلازل، لذلك أصبحت الشركات المصنعة تقوم بخفض الحجم من خلال استخدام غاز *SF6* في العزل بدلاً من الهواء، واستخدام العوازل البلاستيكية بدلاً من البورسلانية.

الاستنتاجات والتوصيات:

تبين من خلال البحث أهمية دراسة تجهيزات المحطات الكهربائية (سيما القديمة منها) لتحمل الزلازل، وخاصة المحولات والعوازل البورسلانية التي تستند عليها القواطع ومحولات التوتر والتيار، وينصح بإعادة دراستها لتحقيق تحمل التجهيزات للزلازل من قبل مختصين. أيضاً عند بناء محطات جديدة لابد من دراسة أثر الزلازل على هذه المحطات، وفي هذه الحالة من الضروري أن يقوم المهندس الإنشائي الدارس للمحطة باستشارة اختصاصي في هذه التجهيزات وآلية عملها.

References:

[1] The Syrian Arab Code for the design and implementation of installations with reinforced concrete - Appendix No. Design and implementation of buildings and structures to resist earthquakes - Syndicate of Syrian Engineers - 2005.

[2] *Rudolph, Wilhelm Einführung in DIN VDE0100-1999-VDE Verlag.*

[3] *Kenngrössen Erdbeben 1996-01: DIN VDE 0100 teil30.*

[4] *Bastami, M. (2007), "Seismic Reliability of Power Supply System Based on Probabilistic Approach", PhD thesis, Kobe University, Japan. Nicht publiziert, da vertrauliche Daten enthaltend; konnte aber eingesehen werden.*

[5] *Koller M.: Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung in der Schweitz - 2. Bericht 2011.*

[6] *IEEE Std 1527-2006 (2006), IEEE Recommended Practice for the Design of Flexible Buswork Located in Seismically Active Areas, IEEE Power Engineering Society, New York.*