حماية محطات الطاقة الريحية من الانفراغات البرقية

الأستاذ الدكتور محمد زهيرة

رئيس لجنة الطاقة في اتحاد المهندسين العرب

Tel. +963933333823 – Email. Zhirh58@scs-net.org

1- **مقدمة**:

يزداد إنتاج الطاقة الكهربائية في أغلب دول العالم من مصادر الطاقة البديلة، وبشكل خاص من العنفات الريحية والمحطات الكهروشمسية، حيث أصبحت نسبة الطاقة المولدة من الطاقات البديلة تشكل أكثر من 20 % من الطاقة الكلية المنتجة في بعض الدول المتقدمة، وتخطط هذه الدول إلى زيادة الطاقة الكهربائية المولدة بواسطة الطاقات البديلة بحيث تغطي أغلب احتياجاتها من الطاقة.

الاستثمارات الكبيرة التي تنفق عند تركيب العنفات الريحية وكلفة وصعوبة صيانتها عند تعرضها للأضرار نتيجة الانفراغات البرقية، بالإضافة إلى قيمة الطاقة المفقودة نتيجة خروج العنفات من الخدمة أثناء العطل تجعل من الضروري جداً حمايتها من الصواعق بموثوقية عالية. وتؤثر الإصابة المباشرة بصاعقة على تجهيزات العنفة الريحية، وبشكل خاص على أجهزة القيادة والتحكّم الحسّاسة جداً والمتواجدة في منطقة ضيقة (سرّة العنفة).

وقد صدر في السنوات الأخيرة عدد من المواصفات القياسية العالمية والوطنية حول كيفية إقامة نظام حماية من الصواعق لمحطات الطاقة البديلة وتلزم شركات التأمين في الدول الرائدة في مجال الطاقات المتجددة المستثمرين تقديم دراسة الجدوى الاقتصادية لنظام الحماية من الصواعق وفق تحليل عامل الضرر الوارد في المواصفة القياسية العالمية *IEC 62305-2* لعام *2010* حتى يتم التأمين على هذه المحطات.

سنوضّح في هذه البحث كيفية إقامة نظام حماية من الصواعق لمحطات الطاقة الريحية يأخذ بالحسبان التقاط شحنة الصاعقة دون أي ضرر بالإضافة إلى دراسة أثر الحقول الكهرطيسية المرافقة للصاعقة على كل جزء من أجزاء هذه التجهيزات، وبيان نوع الأعطال، ومكان حدوثها، وبيان كيفية حمايتها وفقاً للمواصفات العالمية *IEC62305* لعام *2006* و *IEC61400-24* لعام *2010*، و *VDE* (عدّة أجزاء).

2- **حماية العنفات الريحية**:

احتمال تعرض العنفات الريحية للإصابة بصاعقة بين غيمة والأرض (صاعقة نازلة) هو احتمال كبير نتيجة ارتفاعها. ويُعطى الاحتمال الوسطي لهذه الإصابة بعلاقة *Eriksson*:

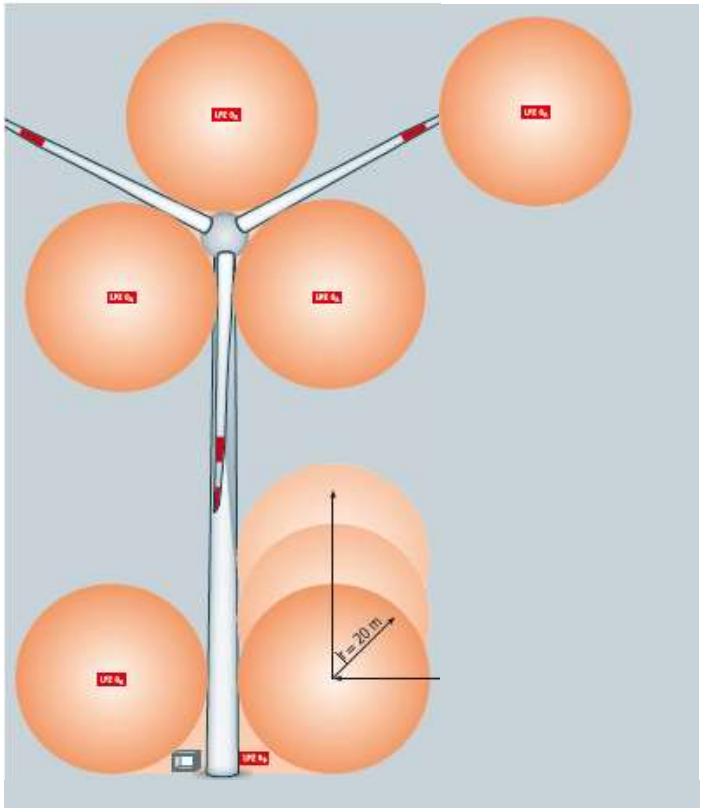
$$n = 2.4 \times 10^{-5} \cdot N_g \cdot H^{2.05} \qquad (1)$$

حيث: N_g – كثافة الصواعق البرقية السنوية في منطقة وجود العنفة.

H – أعلى ارتفاع للعنفة، *[m]*.

فمثلاً من أجل كثافة عواصف برقية مقداره (*2* انفراغ برقي في العام/كم^2)، وارتفاع للعنفة مقداره *75 m*، تحدث إصابة للعنفة بصاعقة مرة واحدة كل ثلاث سنوات. ويمكن الحصول على الاحتمال الأعظمي للإصابة بضرب العلاقة (*1*) بـ (*3*)، وعلى الاحتمال الأصغري للإصابة بتقسيم هذه العلاقة على (*3*). لذلك تحسب في ألمانيا مثلاً إصابة مباشرة واحدة

في العام لكل عنفة ريحية ذات استطاعة تزيد عن *1MW* وما فوق. ويبيّن الشكل (*1*) مكان حدوث الإصابة بصاعقة وفق نظرية الكرة المتدحرجة، حيث تحدث الإصابة في الشفرات أو السّرة. كما يجب الأخذ بالحسبان إمكانية حدوث إصابة جانبية للبرج باعتبار أن ارتفاع البرج أكبر من ارتفاع المرحلة ما قبل الأخيرة للصاعقة (حماية من الدرجة الأولى *20 m*). وعند زيادة ارتفاع العنفة عن *60 m* يجب الأخذ بالحسبان إمكانية حدوث صاعقة بين العنفة والغيمة (صاعقة صاعدة)، ويتميز هذا النوع من الصواعق بالشحنة الكبيرة جداً (نبضة تيار طويل)، مما قد يسبب صهر جزء من معدن العنفة (وبالتالي تصبح ضعيفة للإجهادات الميكانيكية)، أو حدوث حريق، بالإضافة إلى أن اختيار وتركيب مفرغات التيار لمثل هذا النوع من الصواعق هو أمر بالغ الصعوبة.



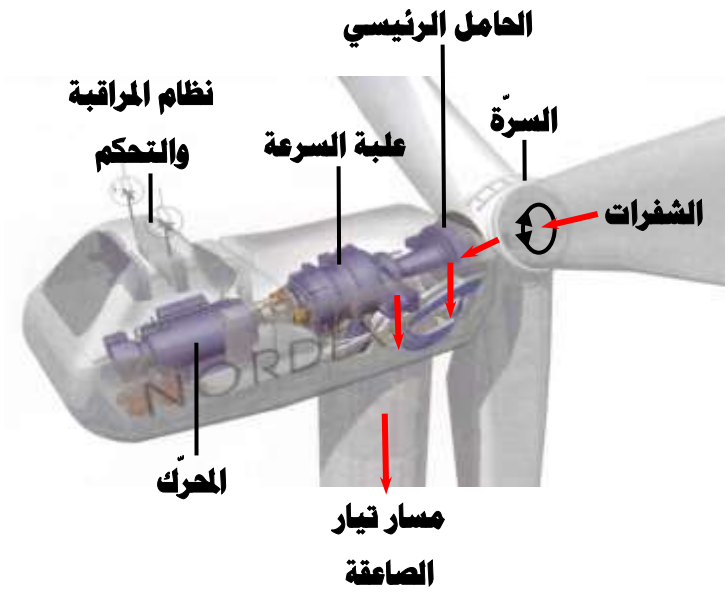
الشكل (*1*) تحديد مكان إصابة العنفة بصاعقة وفق نظرية الكرة المتدحرجة.

تحدد المواصفات القياسية الخاصة بحماية العنفات الريحية من الصواعق (*IEC61400-24* و *VDE 0127-24*) متطلبات حماية من الدرجة الأولى لهذه العنفات، أي يجب اعتماد القيم التصميمية التالية للصاعقة وفق *IEC62305*.

I_{max}	I_{min}	*di/dt*	قطر كرة الصاعقة	*W/R*	*Q*	زمن البقاء
200 kA	***3 kA***	***200 kA/μs***	***20 m***	***10 Mj/Ω***	***200 C***	***T=0.5 s***

القيم المميزة لتيار الصاعقة من أجل انفراغ بين غيمة والأرض.

تتوضّع أغلب التجهيزات الحساسة للعنفة الريحية في منطقة السرّة والجدول، الشكل (*2*).



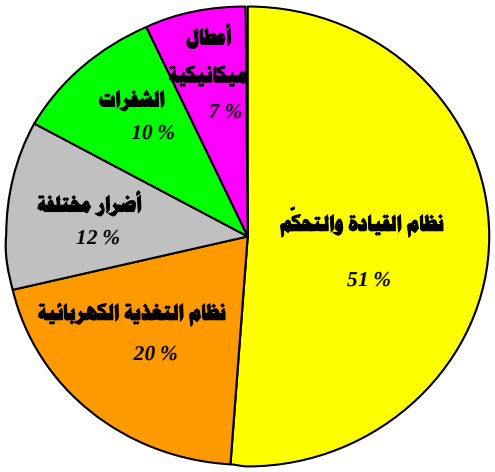
الشكل (2) توضّح التجهيزات الحساسة للعنفة الريحية في منطقة السرّة والجندول.

ويبيّن الجدول (1) أثر كل قيمة من القيم المميّزة للصاعقة، وجزء العنفة المتضرّر نتيجة هذه القيمة.

الجزء المتضرّر من العنفة	الأثر	القيمة المميّزة
نظام القيادة والتحكّم في العنفة	– ارتفاع كمون الأرض مكان تفريغ التيار. – تحريض توترات زائدة طولانية وعرضانية في كابلات القيادة والتحكّم.	القيمة الاسمية لتيار الصاعقة $\hat{I} = 200\ kA$
نظام القيادة والتحكّم	طاقة كبيرة محوّلة في أجهزة الحماية من التوترات الزائدة (المفرغات).	شحنة التيار النبضي
الشفرات	– صَهر جزء من المعدن – حدوث حريق	شحنة التيار الطويل
الشفرات	إجهادات ديناميكية	القدرة النوعية لتيار الصاعقة
نظام القيادة والتحكّم	تحريض توترات زائدة	الميل الأعظمي لتيار الصاعقة di/dt

الجدول (1)

تحدث أغلب الأعطال في نظام القيادة والتحكم في العنفة كما هو مبيّن في الشكل (3) وفق دراسة إحصائية دنماركية.



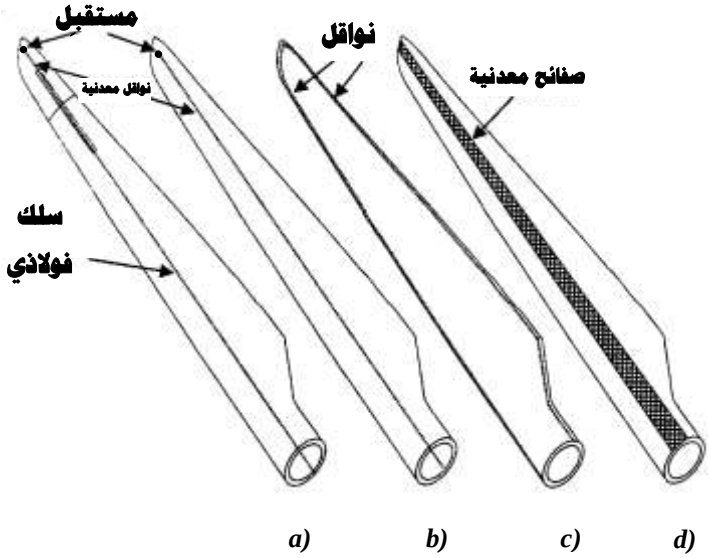
الشكل (3) نسب توزيع الأعطال على أجزاء العنفة (دراسة إحصائية).

2-1 **نظام الحماية الخارجي**:

الغاية منه التقاط شحنة الصاعقة وتفريغ التيار في الأرض دون حدوث حريق أو تخريب في تجهيزات العنفة، ويتكون من لواقط، ونوازل، وتأريض، بالإضافة إلى تجهيزات الحماية من الاهتزازات الميكانيكية، ومن الحريق.

2-1-1 **اللواقط**:

تحدث الإصابة المباشرة للعنفة غالباً في الشفرات، لذلك لا بد من تركيب نواقل لسريان تيار الصاعقة من مكان الإصابة (الشفرات) إلى جسم البرج دون عبور علبة السرعة التي تحوي على الأجزاء الحسّاسة.وتركّب هذه النواقل داخل الشفرة (شكل *4,a*) أو على الشفرة (شكل *4,b*)، أو على حواف الشفرة (شكل *4,c*)، و تكون النواقل عبارة عن معدن بقياس *3×30 mm*، أو نواقل من النحاس بقطر *10 mm* (شكل *4,d*).



الإمكانيات:

***a*. ناقل معدني في المراوح.**

***b*. ناقل معدني على المراوح.**

***c*. ناقل معدني حول أطراف المراوح.**

***d*. تركيب صفائح معدنية على أو في الشفرات.**

الشكل (4) تركيب صفائح معدنية على أو في الشفرات لنقل تيار الصاعقة من مكان الإصابة إلى البرج.

ويُعد الاعتماد على معدن العنفة (الشفرات والبرج) من الأخطاء الشائعة في الحماية الخارجية، كونه يسبّب سريان جزء من تيار الصاعقة في علبة السرعة، وبالتالي تلف التجهيزات الحسّاسة المتواجدة فيها، (الشكل 5).

الشكل (5) احتراق التجهيزات الحسّاسة في علبة السرعة نتيجة مرور تيار الصاعقة فيها.

لتفريغ تيار الصاعقة بالأرض دون المرور بمنطقة السرّة يربط الناقل الممدّد في الشفرات ببرج العنفة إذا كان البرج معدنياً وبنواقل التأريض ضمن البرج (عبارة عن نواقل من الحديد المغلفن بقطر *10 mm* تمدد ضمن البرج) إذا كان البرج بيتونياً.

كذلك يمكن ان تصيب الصاعقة في الجندول أو منطقة السرة (الشكل *1*)، لذلك يجب أن يصمم الجندول على شكل صندوق معدني مغلق ليكون جزءاً من نظام الحماية. أما الانفراغات البرقية التي تصيب جسم برج العنفة فيمكن اعتبار جسم البرج المعدني كلاقط، وفي الأبراج البيتونية يجب تمديد حلقات معدنية دائرية تحيط بجسم البرج. المسافة بين هذه الحلقات أقل من قطر كرة الصاعقة (*20 m*). تربط هذه الحلقات مع النوازل إلى نظام التأريض للعنفة.

عند تركيب لواقط على المباني والتجهيزات الملحقة بالعنفات الريحية يجب الأخذ بالحسبان تعرّض هذه اللواقط لقوى انحناء كبيرة نتيجة الرياح، لذلك يجب تثبيتها بشكل جيد.

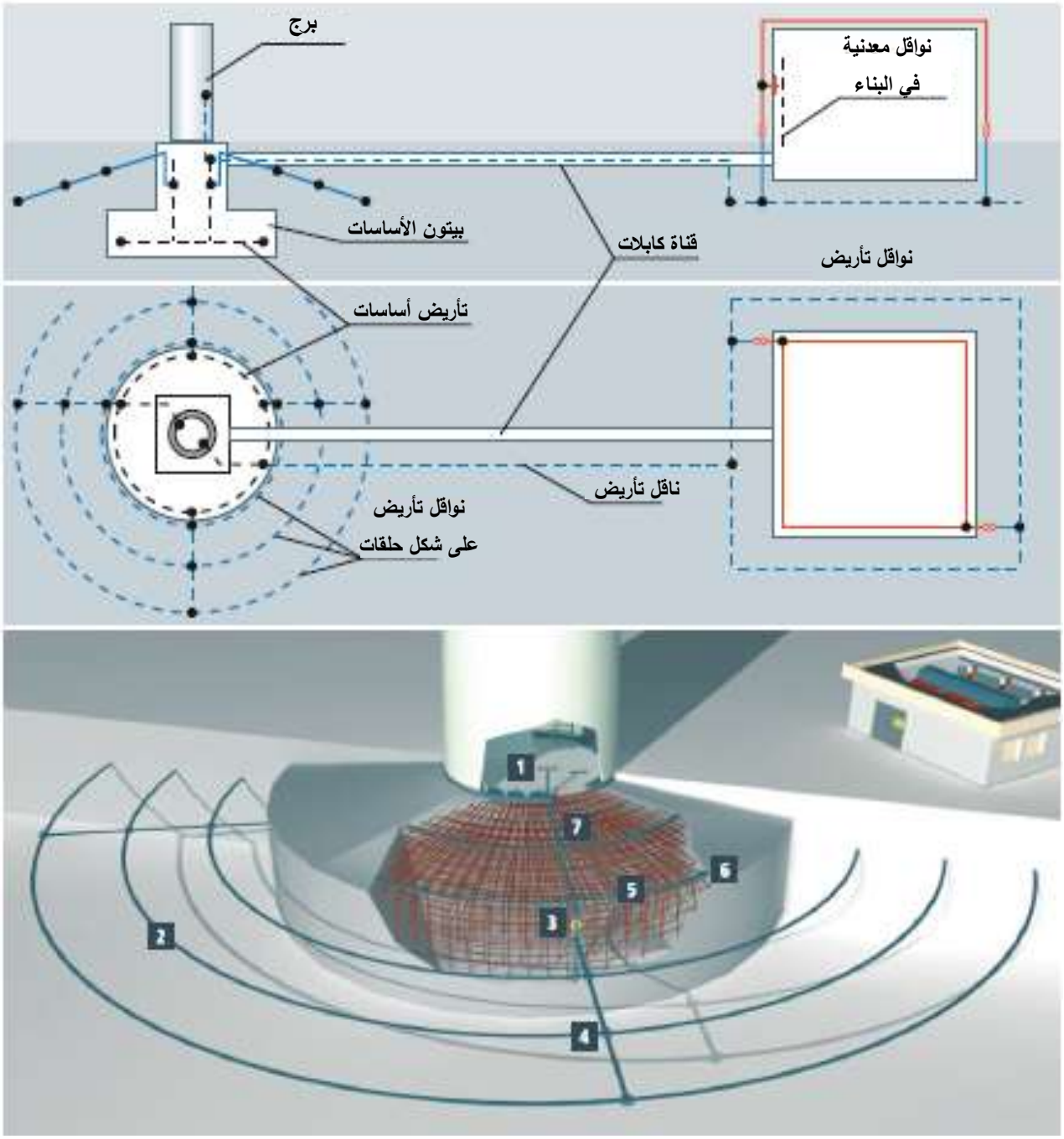
2-1-2 **النوازل**:

يستخدم جسم البرج المعدني كنوازل تربط بين اللواقط وآبار التأريض، وفي العنفات ذات الأبراج البيتونية يمكن تمديد نواقل معدنية تحقق المتطلبات الواردة في *IEC 62305-3* ضمن بيتون البرج تستخدم كنوازل.

3-1-2 **التأريض**:

الغاية من التأريض تشتيت تيار الصاعقة بالأرض دون حدوث اجهادات ديناميكية وحرارية خطيرة على تجهيزات العنفة والحماية من توتر الخطوة وتوتر التماس للأشخاص المتواجدين بالقرب من برج العنفة.

ويتم تأريض العنفة وفق النموذج (*B*) الوارد في *IEC 62305-3*، حيث يربط حديد التسليح لقاعدة البرج مع نواقل تأريض مبسطة (*30 mm×3.5 mm*) أو نواقل دائرية بقطر *10 mm* ممددة على حلقات مربوطة مع بعضها البعض، الشكل (*6*).



1– حلقة تساوي الكمون، 2– نواقل تأريض غير قابلة للصدأ للتخلص من توتر الخطوة وتوتر التماس، 3– نقطة تأريض ظاهرة في قاعدة العنفة تستخدم لربط تأريض عدة عنفات مع بعض، أو ربط تأريض العنفة مع تأريض الأبنية الملحقة، 4– وصلات تصالب، 5– نواقل مبسطة *30 mm×3.5 mm*، 6– مثبتات.

الشكل (*6*) تأريض عنفة ريحية.

تغطى نواقل التأريض بطبقة من البيتون لا تقل سماكتها عن *5 cm*، في الأبنية الملحقة بالمحطة الريحية يمكن استخدام التأريض وفق النموذج *A* (*IEC 62305-3*) الذي يتكون من قطب تأريض لكل نازل أو تأريض من النموذج *B* حسب قيمة المقاومة النوعية للتربة بالقرب من هذه المباني.

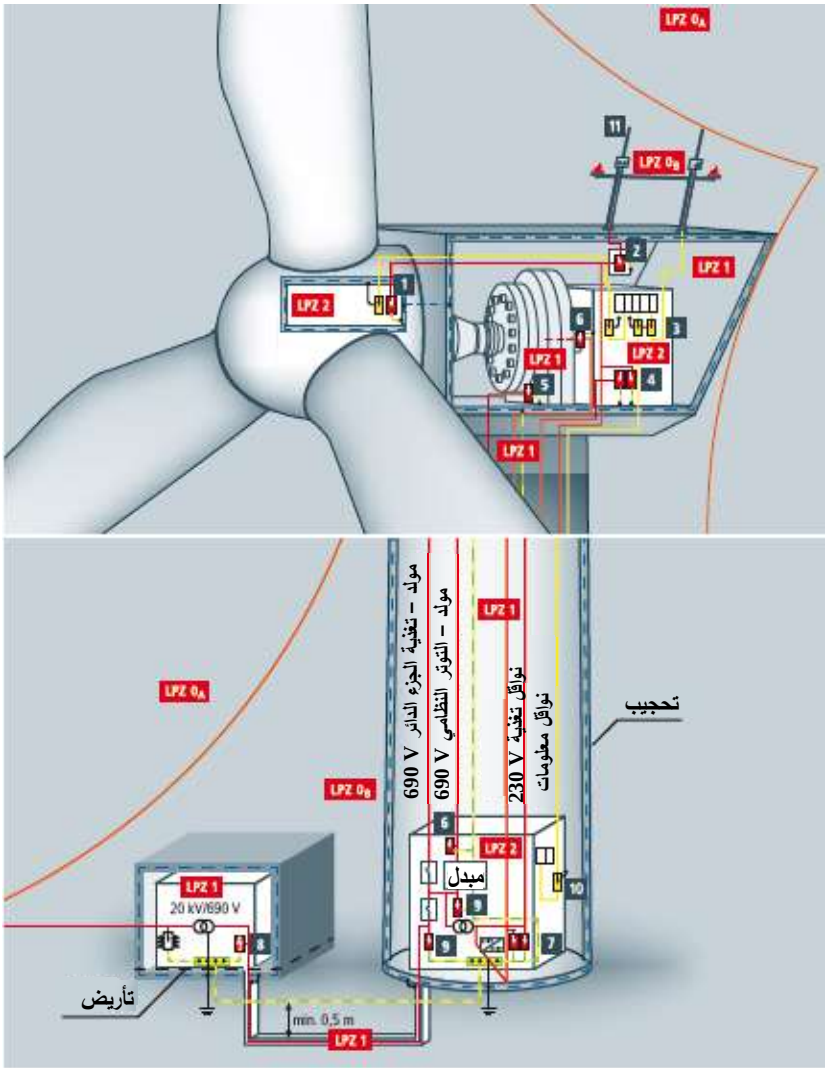
2-2 **نظام الحماية الداخلي** (**حماية نظام التشغيل للعنفة من التوترات الزائدة**):

ويشمل الاجراءات التالية:

- ❖ تمديد نواقل تساوي الكمون.
- ❖ التحجيب ومسافات الأمان.
- ❖ تمديد النواقل ضمن المزرعة الريحية بشكل صحيح.
- ❖ تركيب مفرغات التوتر والتيار المناسبة على حدود مناطق الحماية للتخلص من التوترات الزائدة والتيارات التي تسري في النواقل.

1-2-2 **مناطق الحماية للعنفات الريحية**:

لتنفيذ نظام حماية داخلي فعّال، ولحماية الأجزاء الحساسة الموجودة في علبة السرعة يجب تقسيم مجال الحماية للعنفة الريحية إلى عدة مناطق حماية حسب خواص الحقل الكهرطيسي المرافق لقناة البرق، الشكل (7).



1– مفرغ توتر على نواقل الطاقة الواصلة للسرّة، ومفرغ توتر على نواقل الإشارة بين السرّة والجندول، 2– مفرغ توتر لحماية لمبات الإشارة المستخدمة لتنبيه الطائرات المروحية والشراعية، 3– مفرغ توتر على نواقل الإشارة المستخدمة لقياس حالة الطقس، 4– مفرغات توتر لنواقل الطاقة *230/400 V* الواصلة إلى صندوق القيادة في الجندول، 5– مفرغ توتر لحماية جهة الثابت، 6– مفرغات توتر لحماية جهة الدائر، 7– مفرغات توتر على نواقل الطاقة الواصلة لصندوق القيادة أسفل البرج *230/400 [V]*، 8– مفرغ تيار على نقطة الربط الرئيسية على التوتر *400/690 V*، 9– مفرغات توتر لحماية المبدل، 10– مفرغ توتر لحماية نواقل الإشارة في صندوق القيادة أسفل البرج، 11– لواقط لحماية لمبات الإشارة من الإصابة المباشرة.

الشكل (7) تحديد مناطق الحماية للعنفة الريحية، وتركيب مفرغات الحماية.

في منطقة الحماية O_A تصيب الصاعقة بشكل مباشر، وبالتالي يسري جزء من تيار الصاعقة في النواقل الواردة من هذه المنطقة إلى مناطق الحماية الأخرى. في منطقة الحماية O_B لا تصيب الصاعقة بشكل مباشر (الإصابة تحدث في الشفرات أو جسم البرج)، ولكن شدة الحقل تبقى كما في المنطقة O_A بدون تخفيض في مناطق الحماية LPZ_1 و LPZ_2 لا تصيب الصاعقة بشكل مباشر، ولكن شدة الحقل الكهرطيسي تخفض بشكل كبير جداً بسبب نواقل التحجيب. وكلما زاد رقم منطقة الحماية كلما زاد تخفيض شدة الحقل الكهرطيسي.

جميع النواقل الواردة من منطقة الحماية $LPZO_A$ إلى منطقة الحماية LPZ_1 يركب عليها مفرغات تيار في نقطة الدخول بين المنطقتين. لهذه المفرغات القدرة على تخفيض قيمة جزء تيار الصاعقة الذي يسري فيها بدون أعطال، لذلك يجب اختيار هذه المفرغات على نبضة تيار من الشكل $10/350\ \mu s$ للتأكد من سلامتها قبل تركيبها.

عند عبور كابلات الطاقة من منطقة الحماية $LPZO_B$ إلى LPZ_1 وأعلى يجب تركيب مفرغات توتر (*SPDType2*)، حيث تُختبر هذه المفرغات على نبضة تيار من الشكل $8/20\ \mu s$.

جميع نواقل القيادة والتحكم الواردة من منطقة الحماية O_B إلى منطقة الحماية LPZ_1 ومن LPZ_1 إلى LPZ_2 يركب عليها مفرغات توتر للتخلص من التوترات المتحرّضة فيها نتيجة الحقول الكهرطيسية المرافقة لقناة البرق أو نتيجة التوترات الزائدة الناتجة عن عمليات الفصل والوصل في الشبكة وجميع هذه المفرغات يجب أن تختبر قبل تركيبها على نبضة تيار من الشكل ($8/20\ \mu s$). لذلك نرى من الشكل أن المفرغات المركّبة على النواقل الممدّدة في العنفة هي مفرغات توتر بنماذج مختلفة، ومفرغ تيار يركّب فقط في نقطة الربط الأساسية بين التوتر $400\ V$ و $690\ V$ للتخلص من جزء تيار الصاعقة الذي يسري في الشبكة الهوائية. بالإضافة إلى تركيب المفرغات يجب أن تربط الأغلفة المعدنية لهذه النواقل مع نواقل تساوي الكمون. **وتُمدّد الكابلات المستخدمة في العنفة داخل البرج، وبالتالي تكون شدة الحقل قليلة فيها بسبب التحجيب، ويجب أن تكون جميع الكابلات من النوع المحجّب، كما يجب ربط الغلاف المعدني لها من الجهتين مع وصلة تساوي الكمون، أما الكابلات المستخدمة بين العنفة ومبنى القيادة والتحكّم فتمدّد ضمن ناقل مغلق.**

2-2-2 **تحديد مستوى الحماية لمفرغات التوتر**:

عند تحديد مستوى توتر الحماية لمفرغات التوتر المستخدمة في حماية العنفات الريحية يجب تحديد قيمة توتر التشويش للتجهيزات المراد حمايتها، ويحدد توتر التشويش لنواقل الطاقة والتجهيزات التي تغذيها وفق *IEC 61000-4-5* و *IEC 60664-1*، أما توتر التشويش لنواقل المعلومات فتحدد وفق *IEC 61000-4-5*، أما قيمة توتر التشويش لبقية النواقل والتجهيزات فتحدد من المعلومات التي يقدمها المصنع، ويجب التأكيد على المصنع لتقديم هذه المعلومات.

3-2-2 **حماية تجهيزات الطاقة**:

في العنفات الريحية الكبيرة يمكن وضع المحولة في أماكن مختلفة (أسفل برج العنفة، أعلى برج العنفة، بالقرب من مجموعة التوصيل...الخ)، وتغذي المحولة الموضوعة في أعلى العنفة عدة أجزاء بالطاقة الكهربائية مثل لوحة القيادة في أسفل البرج، نظام التحكم بالشفرات الموجود في السرّة، لوحة التحكم بالجندول...الخ.

تحدد المواصفة القياسية العالمية *IEC 60364-44* قيمة التوتر البرقي المسموح للتجهيزات الكهربائية المستخدمة في العنفة الريحية، وبالتالي توتر الانهيار للمفرغات المستخدمة في حماية هذه التجهيزات. فتوتر الانهيار للمفرغات المستخدمة في حماية التجهيزات ذات التوتر $400/690\ V$ يجب أن يكون أقل من $2.5\ kV$، وتوتر الانهيار للمفرغات المستخدمة في حماية التجهيزات $230/400\ V$ يجب أن يكون أقل من $1.5\ kV$. أما لمبات الإشارة

المستخدمة في تنبيه الطيران والمركّبة في أعلى العنفة (منطقة الحماية O_B) فتمدد الكابلات بين هذه المنطقة ومنطقة الحماية LPZ_1 أو LPZ_2، لذلك نستخدم مفرغ توتر من النوع الذي يركّب على نواقل المعلومات للتخلص من التوترات الزائدة المتحرّضة في هذه الكابلات.

4-2-2 **حماية مولد الإستطاعة**:

يتم حماية ملفات الدائر لمولد الاستطاعة ونواقل الطاقة للمبدلة بواسطة مفرغ توتر ثلاثي (فارستور) توتر الانهيار له أقل من *1000 V* بالإضافة إلى مفرغ أخر عبارة عن ثغرة حماية توتر الفصل المتناوب لها *2.2 kV* لحماية المفرغ الثلاثي (الفارستور) من اضطرابات التوتر، أما من جهة الثابت للمولد فتحمى بواسطة فارستور توتر الانهيار له *690 V*.

4-2-2 **حماية تجهيزات المعلومات**:

يتم حماية التجهيزات وفق *IEC 61643-21* وفق مناطق الحماية من الصواعق، وغالباً تستخدم كابلات معلومات من ألياف زجاجية (محجبة) (الكابلات المستخدمة لدراسة حالة الطقس، الكابلات بين الجندول ونظام التحكم بالشفرات المارة بالسرّة، كابلات التحكم بالشفرات...الخ)، وهذا النوع من الكابلات لا يحتاج إلى مفرغات توتر حيث لا يمكن للحقول الكهرطيسية المرافقة لقناة البرق أن تؤثر على مثل هذه الكابلات. ويجب ربط غلاف التحجيب للكابلات الزجاجية مع وصلات تساوي الكمون.

ملاحظة هامة:

يتم اختبار جميع المفرغات المستخدمة في الحماية من التوترات الزائدة للتجهيزات في العنفة الريحية وفق المواصفة *IEC 61400-24* والتي تحدد نوعين أساسيين من الاختبارات للتأكد من جودة المفرغات المستخدمة:

الاختبار الأول: تطبيق تيارات (برقية) على نواقل التحكم المطبق عليها توتر العمل، وبالتالي تبين المفرغات المستخدمة لحماية هذه النواقل قدرتها على تحمّل جزء من تيار الصاعقة.

الاختبار الثاني: يوصف تأثير الحقول الكهرطيسية (تتعلق شدتها بالميل الأعظمي لتيار الصاعقة على التجهيزات المختبرة).

لخلاصة:

نلاحظ مما سبق أن حماية تجهيزات الطاقة الريحية تتطلّب معرفة كبيرة في آلية عملها، وحماية التجهيزات الحسّاسة فيها، وخاصّةً أجهزة القيادة والتحكّم. ولا يمكن الاعتماد في العنفات الريحية على معدن الشفرات والبرج لنقل تيار الصاعقة، إذ تكون الشفرات مصنوعة على الأغلب من مادة غير ناقلة، وإذا كانت مصنوعة من مادة غير ناقلة فيجب ألا يمر تيار الصاعقة عبر علبة السرعة.