الطور الرابع

الحمايات والترابط الكهربائي

تتويجاً لكافة الحسابات الميكانيكية والكهربائية السابقة، يُعنى هذا الطور بصياغة الفلسفة الحمائية وشرايين الربط الكهربائي للمنظومة في جبهتي التيار المستمر والمتردد (AC/DC). يهدف هذا الجزء إلى تحجيم الموصلات وتقليص فواقد هبوط الجهد، وتوصيف منظومة الحماية من القصر والجهود العابرة بناءً على مبدأ الانتقائية الصارمة، بما يضمن أمان المعدات والتوافق التام مع شبكة التوزيع العامة.

جانب التيار المستمر (DC Side)

تُمثل كابلات الجانب المستمر (DC Side) الشرايين الحيوية لنقل الطاقة الكهربائية المولدة من الخلايا الشمسية إلى مداخل العاكس الذكي. ونظراً لطبيعة تشغيل هذه الكابلات في بيئة السطح الخارجية القاسية، فإن تحجيمها واختيار مواصفاتها الفيزيائية لا يتوقف فقط عند تلبية سعة تيار التشغيل، بل يخضع لقيود حرارية وبيئية صارمة، بالإضافة إلى قيد هبوط الجهد لضمان استقرار عمل خوارزميات تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) وتقليص الفواقد الطاقية.

حسابات واختيار كابلات السلاسل (String Cables Sizing)

أولاً: الحساب الرياضي لتيار التصميم الأقصى للسلسلة ($I_{\mathrm{dc_max}}$)

تفرض الأكواد والمعايير الدولية (مثل IEC 60364-7-712 و NEC Art. 690) تطبيق معامل أمان يبلغ (1.25) على تيار القصر للوح الكهروضوئي (I_{sc}) عند حساب تيار التصميم الأقصى للحمايات والموصلات في الجانب المستمر. يهدف هذا المعامل إلى استيعاب الفترات التشغيلية التي يتجاوز فيها الإشعاع الشمسي الفعلي حدود الظروف القياسية ($\mathrm{STC} = 1000\ \mathrm{W/m^2}$) نتيجة الانعكاسات السحابية أو الظواهر الجوية المؤقتة.

فإن، **LONGi Hi-MO 6 (LR5-72HTH-600M)** بالاعتماد على بيانات اللوح المعتمد في المشروع من طراز قيمة تيار القصر تبلغ:

$$I_{\mathrm{sc}} = 14.46\ \mathrm{A}$$

يتم حساب تيار التصميم الأقصى للسلسلة الواحدة وفق العلاقة التالية:

$$I_{\mathrm{dc_max}} = I_{\mathrm{sc}} \times 1.25$$

$$I_{\mathrm{dc_max}} = 14.46\ \mathrm{A} \times 1.25 = 18.075\ \mathrm{A}$$

بناءً على هذه القيمة، يجب أن تكون السعة الأمبيرية المستمرة للموصل المختصر بعد التصحيح الحراري أعلى من تيار التصميم المقدر بـ $18.075\ \mathrm{A}$.

ثانياً: تطبيق معاملات التصحيح الحراري وظروف التمديد (Derating Factors)

تتعرض كابلات السلاسل الكهروضوئية الممددة فوق هيكل التثبيت أو داخل مجاري الكابلات (Cable Trays) على السطح لإجهاد حراري تراكمي مرتفع. وبما أن طقس مدينة حلب صيفاً يتسم بالحرارة المرتفعة، حيث تصل حرارة أسطح العمل المعرضة للإشعاع المباشر إلى $60^\circ\ \mathrm{C}$، يتوجب تطبيق معايير الكود القياسي IEC 60364-5-52 لتصحيح السعة الأمبيرية الاسمية للكابلات.

الكابلات الشمسية المتخصصة تعتمد عازلاً متطوراً من البولي أوليفين المتشابك (XLPO/XLPE) ذي درجة حرارة تشغيل قصوى للموصل تبلغ $90^\circ\ \mathrm{C}$ أو $120^\circ\ \mathrm{C}$.

- عند درجة حرارة محيطة بالسطح تصل إلى 60° C, يبلغ معامل التصحيح الحراري (k_θ) لعازل الـ 90° C الممدد في الهواء الحر أو القنوات حوالي **0.71** وفقاً لجداول التصحيح القياسية في الكود الدولي (ألقي نظرة على **الملحق "ت"**).
- بالرجوع إلى كتالوج شركة السويدي للكابلات للأنظمة الشمسية (ألقي نظرة على **الملحق "ت"**), نجد أن السعة الأميبرية الاسمية لكابل النحاس الشمسي الموضوع في الهواء الطلق أحادي النواة (Core-1) ذو المقطع $4\ \mathrm{mm}^2$ عند درجة الحرارة المرجعية (30° C) تبلغ 47 A في حال التمديد المتلامس (Flat Touched), و 65 A في حال التمديد المتباعد (Flat Separated). نظراً لأن كابلات السلاسل الشمسية تمدد عادةً داخل قنوات أو في مسارات متقاربة على السطح، فإن القيمة الأدق والأكثر أماناً هي **47 A** .

يتم حساب السعة الأميبرية المصححة الفعالية للكابل ($I_{\text{allowable}}$) كالتالي:

$$I_{\text{allowable}} = I_{\text{nominal}} \times k_\theta$$

$$I_{\text{allowable}} = 47\ \text{A} \times 0.71 = 33.37\ \text{A}$$

بمقارنة السعة الأميبرية المصححة (33.37 A) مع تيار التصميم الأقصى للسلسلة (18.075 A)، نجد أن:

$$I_{\text{allowable}} \geq I_{\text{dc_max}} \Rightarrow 33.37\ \text{A} \geq 18.075\ \text{A}$$

ولا يوجد أي (Thermal Ampacity) وبالتالي، فإن المقطع الفيزيائي $4\ \mathrm{mm}^2$ آمن تماماً من الناحية الحرارية خطر من انهيار العازل أو ارتفاع حرارة الموصل فوق الحدود التشغيلية الآمنة تحت أقصى ظروف الصيف التشغيلية.

ثالثاً: تحديد المواصفات الفيزيائية والمقطع الفيزيائي الأنسب

بناءً على التحليل الحراري المتقدم، يُمنع منعاً باتاً استخدام كابلات التيار المتردد (AC) التقليدية ذات غلاف الـ PVC في تمديدات الجانب المستمر، لتفادي التفكك السريع للغلاف بفعل الأشعة فوق البنفسجية وما ينتج عنه من انهيار عازلية وقوس كهربائي مستمر (DC Arc) يصعب إطفاؤه.

مطابقة للمواصفة القياسية **(Solar PV Cables)** لذا، تم اعتماد **كابلات طاقة شمسية متخصصة** الأوروبية **EN 50618** بالمواصفات التالية:

1. **الموصل (Conductor):** نحاس مرن متعدد النوى مكسو بالقصدير (Tinned Copper) لمقاومة التأكسد والتآكل الكيميائي الناتج عن الرطوبة والعوامل الجوية.
2. **العزل والغلاف (Insulation & Jacket):** عزل مزدوج (Double Insulation) من مادة البولي أوليفين المتشابك خالية من الهالوجين ومنخفضة انبعاث الدخان (LSZH / XLPO).
3. **المقاومة البيئية:** مقاومة عالية للأشعة فوق البنفسجية (UV-Resistant)، وغاز الأوزون، والانتشار اللهبي، ومصممة لعمر تشغيلي يتجاوز 25 عاماً ليتوافق مع عمر الألواح.

للمفاضلة بين اختيار المقطع $\mathbf{4\ mm^2}$ أو $\mathbf{6\ mm^2}$ ، سيتم الاحتكام إلى المحدد الرياضي الثالث والحاسم وهو "قيد هبوط الجهد المسموح" لتقليص الفواقد الحثية والأومية.

رابعاً: حساب هبوط الجهد في جانب التيار المستمر (DC Voltage Drop)

تفرض الممارسة الهندسية الرصينة ألا يتجاوز هبوط الجهد في جانب التيار المستمر نسبة $\leq 1\%$ لضمان عدم إزاحة وتشويه قيمة الجهد الواصل إلى دخل العاكس الكهروضوئي، مما يحمي كفاءة عمل منظم الـ MPPT ويمنع هدر الطاقة الاستثمارية للمنظومة.

المعطيات التصميمية للحساب الرياضي:

- عدد ألواح السلسلة الواحدة (N) = 13 لوحاً موصولة على التوالي.
- تيار التشغيل الفعلي للسلسلة عند نقطة القدرة القصوى (I_{mp}) = 13.44 A.
- جهد التشغيل الاسمي للسلسلة عند الشروط المعيارية ($V_{\text{string_STC}}$):

$$V_{\text{string_STC}} = 13 \times V_{\text{mp}} = 13 \times 44.66 \quad \text{V} = 580.58 \quad \text{V}$$

- جهد التشغيل الأدنى المتوقع للسلسلة صيفاً عند حرارة خلايا $60^\circ\ \text{C}$ (من حسابات الفقرة 10-14):

$$V_{\text{string_summer}} = 13 \times V_{\text{mpp-min}} = 13 \times 40.127 \quad \text{V} = 521.65 \quad \text{V}$$

- طول مسار الكابل الفعلي التقديري (من أبعد لوح في المصفوفة وحتى موقع العاكس) = $L =$ $30 \quad \text{m}$. وبما أن التوصيل يمثل دائرة مغلقة (ذهاب وإياب لطرفي الموجب والسالب)، فإن الطول الإجمالي للموصل المار فيه التيار هو:

$$L_{\text{total}} = 2 \times L = 2 \times 30 = 60 \quad \text{m}$$

- المقاومة النوعية للنحاس المصححة حرارياً عند متوسط درجة حرارة تشغيل الكابل تحت أشعة الشمس المستمرة ($\approx 70^\circ\ \text{C}$)، وتحسب من العلاقة:

$$\rho_{70} = \frac{R_{70} \times A}{L}$$

حيث أن:

- $\boldsymbol{\rho_{70}}$ **("Resistivity"):** هي المقاومة النوعية للمادة عند درجة حرارة ($70^\circ\ \text{C}$)، وتُقاس عادةً في الحسابات الكهربائية بواحدة عند درجة حرارة تشغيل الكابل ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).
- $\boldsymbol{R_{70}}$ **("Resistance"):** هي مقاومة الناقل عند درجة حرارة ($70^\circ\ \text{C}$)، وواحدتها ($\Omega\ /\text{km}$).
- $\boldsymbol{A}$ **("Cross-sectional Area"):** هي مساحة مقطع الموصل بواحدة (mm^2).
- $\boldsymbol{L}$ **("Length"):** هو الطول، وبما أن المقاومة في الكتالوج معطاة لكل كيلومتر، فإننا نستخدم 1000 متر لتحويل الواحدة.

نقوم بحساب مقاومة الناقل عند درجة حرارة $70^\circ\ \text{C}$، بناءً على معادلة التصحيح الحراري:

$$R_{70} = R_{20} \times [1 + \alpha \times (\theta - 20)]$$

حيث:

- $R_{20} = 4.61 \quad \Omega\ /\text{km}$ (من جدول الكابل المعتمد ذو المقطع $4\ \text{mm}^2$).
- $\alpha = 0.00393$ (المعامل الحراري للنحاس).
- $\theta = 70^\circ\ \text{C}$ (متوسط درجة حرارة تشغيل الكابل تحت الشمس).

الحساب العددي:

$$R_{70} = 4.61 \times [1 + 0.00393 \times (70 - 20)] = 4.61 \times 1.1965 \approx 5.516 \quad \Omega\ /\text{km}$$

بالتعويض في قانون المقاومة النوعية:

$$\rho_{20} = \frac{5.516 \quad \Omega\ /\text{km} \times 4\ \text{mm}^2}{1000 \quad \text{m}}$$

$$\rho_{20} = 0.0220 \quad \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

يُحسب هبوط الجهد بالقيمة المطلقة (ΔV) وفق العلاقة الكلاسيكية للتيار المستمر:

$$\Delta V = \frac{2 \times L \times I_{\text{mp}} \times \rho}{A}$$

حيث أن (A) يمثل المقطع العرضي للموصل بـ (mm^2).

الحالة الأولى: التحقق عند استخدام مقطع كابل $A = 4\ \text{mm}^2$

1. **قيمة هبوط الجهد الفعلي:**

$$\Delta V = \frac{2 \times 30 \quad \mathrm{m} \times 13.44 \ \mathrm{A} \times 0.0220 \quad \Omega \cdot \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}}{4 \ \mathrm{mm}^2} = 4.435 \quad \mathrm{V}$$

2. **النسبة المئوية لهبوط الجهد عند الشروط القياسية (STC):**

$$\% \ \Delta V_{\mathrm{STC}} = \left(\Delta \frac{V}{V_{\mathrm{string_STC}}}\right) \times 100\% = \left(4.435 \frac{\mathrm{V}}{580.58} \quad \mathrm{V}\right) \times 100\% = 0.763\%$$

3. **النسبة المئوية لهبوط الجهد في أشد أيام الصيف حرارة (أقل جهد تشغيلي للمصفوفة):**

$$\% \ \Delta V_{\mathrm{summer}} = \left(\Delta \frac{V}{V_{\mathrm{string_summer}}}\right) \times 100\% = \left(4.435 \frac{\mathrm{V}}{521.65} \quad \mathrm{V}\right) \times 100\% = 0.85\%$$

نلاحظ أن النسبة المئوية لهبوط الجهد في الحالتين (0.763%) و (0.85%) تقع بأمان تام **دون الحد الأكاديمي الصارم المعين بـ** $\leq 1\%$.

الحالة الثانية: التحقق عند استخدام مقطع كابل $A = 6 \ \mathrm{mm}^2$
في حال الرغبة في خفض المفاقيد الأومية إلى أدنى مستوى تشغيلي ممكن، نختبر مقطع $6 \ \mathrm{mm}^2$:

1. **قيمة هبوط الجهد الفعلي:**

$$\Delta V = \frac{2 \times 30 \quad \mathrm{m} \times 13.44 \ \mathrm{A} \times 0.022 \quad \Omega \cdot \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}}{6 \ \mathrm{mm}^2} = 2.956 \quad \mathrm{V}$$

2. **النسبة المئوية لهبوط الجهد صيفاً:**

$$\% \ \Delta V_{\mathrm{summer}} = \left(2.956 \frac{\mathrm{V}}{521.65} \quad \mathrm{V}\right) \times 100\% = 0.566\%$$

من الناحية الفنية والمعيارية، يحقق المقطع $\mathbf{4 \ mm^2}$ المتطلبات الكهربائية والأمنية بشكل ممتاز؛ فهو يتحمل السعة الأمبيرية المطلوبة صيفاً بأمان عالي ($33.37 \ \mathrm{A} \geq 18.075 \ \mathrm{A}$)، ويحافظ على هبوط الجهد تحت عتبة الـ 1% القياسية محققاً نسبة (0.85%).

التوصية التطبيقية

يتم اعتماد كابلات طاقة شمسية بمقطع $\mathbf{4 \ mm^2}$ كمعيار عام لكافة السلاسل القريبة والمتوسطة البعد من العاكس نظراً لجدواها الاقتصادية العالية ومرونتها الميكانيكية العالية أثناء التمديد، بينما يُوصى هندسياً برفع المقطع إلى $\mathbf{6 \ mm^2}$ فقط للسلسلة الأكثر بعداً على السطح (في حال تجاوز طول المسار الواحد 35 متراً في الواقع التشغيلي) كإجراء تحسيني لرفع كفاءة المنظومة الإجمالية وتقليل الهدر الحراري إلى أدنى حد ممكن.

حساب وتوصيف مصاهر حماية السلاسل (String Fuses Selection)
خط الدفاع الموضعي الأول لحماية الخلايا الكهروضوئية (String Fuses) تُمثّل مصاهر حماية السلاسل ضد مخاطر تيارات الخطأ الزائدة وتيارات القصر العكسية. (DC Side) والموصلات في الجانب المستمر ويخضع اختيار وتوصيف هذه المصاهر لمعايير دولية صارمة، أبرزها المعيار العالمي للمصهرات الشمسية الخاص بمتطلبات التمديدات **IEC 60364-7-712** والمعيار (**gPV** الفئة المعيارية) **IEC 60269-6** الكهروضوئية. تهدف هذه الفقرة إلى إجراء الحساب العددي الدقيق للسعة الاسمية للمصهر وتحليل متراجحات الحماية والربط الانتقائي لضمان الموثوقية التشغيلية ومنع أي فصل عشوائي (Nuisance Tripping).

أولاً: الحساب العددي لسعة المصهر الاسمي (I_{fuse})

تستند الممارسة الهندسية في حساب السعة الاسمية لمصهر السلسلة إلى تيار القصر للوح الشمسي عند الشروط المعيارية (I_{sc})، مع تطبيق معامل أمان يحقق معايير الاستقرار التشغيلي ويبلغ 1.56. هذا المعامل (1.56) هو نتاج دمج معاملي أمان؛

- الأول (1.25) لمواجهة تأثير استمرار التشغيل لفترات طويلة وتجنب التقادم الحراري المبكر للمصهر نتيجة التيارات المستمرة،
- الثاني (1.25) لحماية النظام من ظاهرة الارتفاع المفاجئ لشدة الإشعاع الشمسي فوق القيم المعيارية نتيجة انعكاسات الغيوم (Cloud Enhancement Effect) الحاصلة في الموقع التشغيلي.

نجد أن، بالرجوع إلى البيانات الفنية للوح المعتمد في المشروع (طراز **LONGi Hi-MO 6** *LR5-72HTH-600M*) تيار القصر يبلغ:

$$I_{\text{sc}} = 14.46 \text{ A}$$

تُحسب السعة الدنيا المحسوبة للمصهر ($I_{\text{fuse_calc}}$) وفق العلاقة التالية:

$$I_{\text{fuse_calc}} = I_{\text{sc}} \times 1.56$$

$$I_{\text{fuse_calc}} = 14.46 \text{ A} \times 1.56 = 22.5576 \text{ A}$$

بناءً على هذه النتيجة الرقمية، يتم اختيار السعة القياسية التجارية الأعلى مباشرة والمصممة خصيصاً لحماية الأنظمة الشمسية الكهروضوئية (gPV)، وجهد تشغيل لا يقل عن **1000 Vdc**، وهي $I_{\text{fuse}} = 25 \text{ A}$ لضمان التوافق مع جهد المصفوفة.

ثانياً: التحقق من قيود حماية اللوح (Module Bounding Constraints)

لضمان سلامة الألواح من التلف الفيزيائي وخطر الحريق، تشترط المعايير الهندسية وأكواد التصنيع ألا تتجاوز السعة الاسمية للمصهر المختار قيمة "أقصى سعة لمصهر السلسلة (Maximum Series Fuse Rating)" المحددة صراحة من قِبل الشركة المصنعة للوح في ورقة البيانات الفنية. بالعودة لكتالوج لوح LONGi المعتمد، نجد أن هذه القيمة تبلغ:

$$I_{\text{fuse_max_module}} = 25 \text{ A}$$

بذلك، يتم صياغة متراجحة التحقق والامتثال الآتية:

$$I_{\text{fuse_calc}} \leq I_{\text{fuse}} \leq I_{\text{fuse_max_module}}$$

$$22.56 \text{ A} \leq 25 \text{ A} \leq 25 \text{ A}$$

بما أن السعة المختارة (25 A) تحقق المتراجحة الهندسية تماماً وتتطابق مع الحد الأقصى المسموح به من المصنع، فإن هذا الاختيار يضمن حماية مثالية للألواح؛ حيث يتحمل المصهر التيارات العابرة الطبيعية دون تقادم، وفي الوقت نفسه يحمي خلايا اللوح من الانهيار في حال حدوث خطأ.

ثالثاً: التحقق العملي من التنسيق الحمائي

تعتمد المنهجية الهندسية في اختيار المصهرات والكابلات على علاقة متراجحة صارمة، تصاغ رياضياً لضمان عدم وصول الموصل إلى مرحلة الانهيار الحراري أو ذوبان العازل قبل أن تقوم أداة الحماية بفصل الدائرة:

$$\text{Cable Ampacity } (I_z) \geq I_{\text{fuse/breaker}} \geq I_{\text{design}} (I_b)$$

تعريف أطراف المتراجحة أكاديمياً وفق الآتي:

1. I_{design} **(تيار التصميم):** هو أقصى تيار تشغيلي متوقع مرورُه في السلسلة (بعد ضرب تيار القصر بمعاملات الأمان)، ويجب أن يكون المصهر قادراً على تمريره دون فصل زائف (Nuisance Tripping).

2. I_{fuse} **(سعة المصهر الاسمية):** هي عتبة التحسس الحراري للمصهر، وتُختار لتكون أعلى من تيار التصميم ولكن أقل من قدرة الكابل الفيزيائية.
3. I_z **(السعة الأمبيرية المصححة للكابل):** هي أقصى تيار يمكن للموصل تحمله في بيئة تشغيله الواقعية (بعد خفضه بمعاملات التصحيح الحراري f_{derating})، ويجب أن تظل هذه القيمة هي الأعلى دائماً لضمان بقاء الكابل في المنطقة الآمنة حرارياً.

المعطيات الرقمية التصميمية للمنظومة:

1. **تيار التصميم الأقصى للسلسلة ($I_{\text{dc_max}}$):** تم حسابه بـ $\mathbf{18.075\ A}$ (بناءً على تيار القصر للوح $14.46\ \text{A} \times 1.25$.
2. **سعة المصهر الاسمي المختارة (I_{fuse}):** تم اعتماد سعة $\mathbf{25\ A}$ من الفئة gPV.
3. **السعة الأمبيرية المصححة للكابل صيفاً (I_z):** لمقطع $\mathbf{4mm^2}$ عند حرارة سطح $60°\ \text{C}$ بلغت $\mathbf{33.37\ A}$.
4. **أقصى سعة مصهر مسموح بها للوح ($I_{\text{fuse_max_module}}$):** وفق ورقة بيانات LONGi تبلغ $\mathbf{25\ A}$.

بتطبيق المتراجحة على القيم الفعلية للمشروع، نجد أن:

$$33.37\ \text{A} \geq 25\ \text{A} \geq 18.075\ \text{A}$$

الاستنتاج الهندسي من المتراجحة المحققة:

- **ضمان استمرارية التشغيل:** بما أن ($25\ \text{A} > 18.075\ \text{A}$)، فإن المصهر لن يسبب أي فصل زائف (Nuisance Tripping) "تعزيز الغيوم" أثناء ذروة الإشعاع الشمسي أو فترات".
- **ضمان الحماية الحرارية للموصل:** بما أن ($33.37\ \text{A} > 25\ \text{A}$)، فإن المصهر سيعمل كـ "حلقة أضعف كهربائياً" ويفصل الدائرة عند حدوث أي عطل قبل أن تصل حرارة الكابل إلى العتبة الحرجة التي تسبب ذوبان العازل XLPE أو نشوب حريق.

رابعاً: تطبيق متراجحة الحماية والانتقائية الكهربائية ضد تيارات القصر العكسية

تنشأ تيارات القصر العكسية (Reverse Fault Currents) عند حدوث عطل قصر صريح (Short Circuit) في إحدى السلاسل الكهروضوئية (بسبب انهيار العزل، أو حدوث خطأ أرضي، أو تلف ديودات العبور Bypass Diodes)، مما يؤدي إلى انخفاض جهد هذه السلسلة وتحولها إلى حمل يتدفق إليه التيار من بقية السلاسل السليمة المربوطة معها على التوازي.

يُحسب تيار الخطأ العكسي الأقصى المتوقع تدفقه إلى السلسلة، **IEC 60364-7-712** وفقاً للمعيار الدولي المعيبة بناءً على عدد السلاسل المتوازية (N_s) المربوطة على نفس النقطة الكهربائية (نفس متعقب الـ MPPT) عبر المعادلة:

$$I_{\text{reverse_max}} = (N_s - 1) \times I_{\text{sc}}$$

لتحليل الحاجة الفنية وتحقيق الانتقائية الكهربائية في منظومتنا، نراجع التوزيع الكهربائي الفعال المعتمد *Huawei SUN2000-25KTL-M5* للسلاسل الثلاث على متعقبات القدرة للعاكس الذكي:

1. **حالة المتتبع الأول (MPPT 1):** يتصل عليه سلسلتان على التوازي ($N_s = 2$).

$$I_{\text{reverse_max}} = (2 - 1) \times 14.46\ \text{A} = 14.46\ \text{A}$$

   من وجهة نظر الأكواد الصارمة، بما أن تيار القصر العكسي الأقصى القادم من السلسلة السليمة الموازية ($14.46\ \text{A}$) هو أقل من قدرة تحمل الألواح للتيار العكسي ($25\ \text{A}$)، فإن الألواح تمتلك أماناً ذاتياً بطبيعتها الفيزيائية ضد تيارات القصر العكسية البينية، ولا يُعد تركيب المصهر إلزامياً معيارياً لحمايتها من السلاسل الموازية في هذه الحالة المحددة.

2. **حالة المتتبع الثاني (MPPT 2):** تتصل عليه سلسلة واحدة منفردة ($N_s = 1$).

$$I_{\text{reverse_max}} = (1 - 1) \times 14.46\ \text{A} = 0\ \text{A}$$

في هذه الحالة، تنعدم احتمالية تدفق تيار عكسي من سلاسل أخرى نظراً لعدم وجود ربط متوازٍ على هذا المدخل.

القرار الهندسي والتوصيف التطبيقي للمشروع:

على الرغم من أن المعايير الدولية لا تفرض تركيب مصهرات للسلاسل في حال كان عدد السلاسل المتوازية لكل متتبع مساوياً أو أقل من اثنين ($N_s \leq 2$)، إلا أنه **تم اعتماد تركيب مصاهر حماية مستقلة لكل سلسلة من السلاسل الثلاث** بسعة 25 A وجهد تشغيلي 1000 VDC من الفئة gPV داخل لوحة تجميع عزل الجانب المستمر، وذلك استناداً للمسوغات الهندسية الأكاديمية والتشغيلية التالية:

1. **الحماية من تيار التفريغ العكسي للعاكس (Inverter Back-feed):** يؤدي حدوث عطل أرضي أو قصر في كابلات السلسلة إلى تفريغ مفاجئ وعنيف للطاقة المخزنة في مكثفات دارة التنعيم (DC-Link) للعاكس نحو نقطة العطل بتيار ضخم؛ مما يستلزم وجود مصهر gPV سريع لعزل العطل وحماية المكونات الإلكترونية الحساسة للعاكس.
2. **تحقيق الانتقائية المطلقة (Absolute Discrimination):** تضمن الخصائص الزمنية-الأمبيرية (Time-Current Curves) للمصهر سرعة فصل فائقة تقع بالكامل تحت منحنى فصل القاطع الرئيسي للجانب المستمر، مما يضمن عزل السلسلة المعطوبة موضعياً دون تفعيل القاطع الرئيسي ودون إطفاء كامل الحقل الشمسي، حفاظاً على استمرارية التشغيل ومعدل الأداء (PR).
3. **تيسير الصيانة وعزل الأحمال آمنياً:** تعمل حوامل المصهرات (Fuse Holders) كأداة فصل ميكانيكي يدوي آمن، تتيح لفنيي الصيانة عزل وتتبع أعطال كل سلسلة، وإجراء اختبارات مقاومة العزل (Isolation Resistance) بشكل مستقل دون الحاجة لإيقاف المحطة بالكامل.

خامساً: المواصفات الفنية للمصاهر المختارة

بناءً على الحسابات والتحليلات المتقدمة السابقة، يتم توصيف مصاهر حماية السلاسل هندسياً وتجارياً لإدراجها في جداول الكميات (BOQ) كما يلي:

- **نوع وحجم المصهر:** مصهر أسطواني مخصص للأنظمة الكهروضوئية (Cylindrical Solar PV Fuse-Link).
- **الفئة التشغيلية المعيارية:** gPV (وفق المعيار الدولي **IEC 60269-6** لقطع تيارات القصر المستمرة بفعالية وسرعة فائقة).
- **السعة الاسمية المقننة (I_n):** 25 A.
- **الجهد الاسمي الأقصى المستمر (V_n):** 1000 V DC (يغطي بأمان تام جهد الدارة المفتوحة الحرجة للسلسلة شتاءً والمحسوب في الفقرة 10-15).
- **سعة القطع المقننة (Breaking Capacity - I_1):** 30 kA، لضمان الصمود الميكانيكي والكهربائي والقدرة على إخماد القوس الكهربائي المستمر (DC Arc) بأمان عند الفصل تحت ظروف الخطأ القصوى.

قواطع الفصل والعزل لمدخل العاكس (Main DC Isolators / Breakers)

يُعد توفير وسيلة فصل وتوصيل ميكانيكية عند مدخل التيار المستمر للعاكس متطلباً معيارياً تفرضه المواصفة **IEC 60364-7-712** لضمان سلامة الفنيين أثناء الصيانة ولتمكين العزل الفوري في حالات الطوارئ. وبما أن عاكس **Huawei SUN2000-25KTL-M5** يحتوي على مفتاح DC مدمج (Integrated DC Switch)، إلا أن التصميم الهندسي يقتضي وجود قواطع خارجية إضافية ضمن صندوق الحماية لتوفير حماية احتياطية وعزل مرئي قبل دخول الكابلات إلى جسم العاكس.

أولاً: حساب وتوصيف قواطع المداخل (MPPT Breakers)

بناءً على معيارين أساسيين (DC Switch-Disconnectors / Isolators) يتم اختيار قواطع عزل التيار المستمر:

1. جهد عزل القاطع (U_n)

يجب أن يكون جهد العزل الاسمي للقاطع (U_n) أكبر من أقصى جهد دائرة مفتوحة للمصفوفة عند أدنى درجة حرارة متوقعة (V_{oc_max}). من الحسابات السابقة (في الفقرة 10-14 الخاصة بالتحليل الحراري الحرج

لجهود الألواح الكهروضوئية)، نجد أن الجهد الأقصى للوح الواحد عند أدنى درجة حرارة ($0°$ C) يبلغ $V_{\text{oc_max}} = 56.64 \quad \text{V}$.

ومن أجل السلسلة الواحدة المكونة من 13 لوحاً موصولة على التوالي، يُحسب الجهد الأقصى كالتالي:

$$V_{\text{string_max}} = 13 \times 56.64 \quad \text{V} = 736.32 \quad \text{V}$$

وبناءً على هذه القيمة الفيزيائية، يجب أن يتحمل القاطع جهداً مستمراً لا يقل عن $736.32 \quad \text{V}$. وبذلك تكون السعة القياسية التجارية المناسبة لجهد تشغيل القاطع هي **1000 Vdc**، مما يمنح المنظومة هامش أمان عزل كافٍ وموثوق ضد الانهيار الكهربائي.

2. تيار تصميم القاطع (I_{breaker})

يجب أن يتحمل القاطع تيار التصميم المحسوب بتطبيق معامل أمان (1.25) على تيار القصر الإجمالي لكل مدخل MPPT لضمان عدم الفصل الحراري أو التلف الناتج عن الارتفاع المفاجئ في شدة الإشعاع الشمسي.

وفقاً لتوزيع السلاسل المعتمد في المشروع، حيث يتصل كل مدخل من مداخل العاكس بسلسلة واحدة منفردة (تضم 13 لوحاً)، وبالرجوع للمواصفات الفنية للوح المعتمد **LONGi Hi-MO 6**، نجد أن تيار القصر يبلغ $I_{\text{sc}} = 14.46 \quad \text{A}$. وبتطبيق معامل الأمان، نجد أن تيار التصميم يساوي:

$$I_{\text{breaker_calc}} = 14.46 \quad \text{A} \times 1.25 = 18.075 \quad \text{A}$$

وبالتالي، لتوحيد المكونات وتسهيل عمليات الصيانة الدورية وتأمين توفر القطع التبديلية، سيتم اعتماد مفتاح عزل بسعة اسمية تبلغ **32 A**. وجدير بالذكر هنا أنه بما أن جهاز العزل المستخدم هو مفتاح قطع تحت الحمل (Load Break Switch)، وقطعه الأساسية تكمن في تحمل التيار المستمر الكامل ووظيفته الأساسية تكمن في تحمل التيار المستمر الكامل وقطعه يدوياً بأمان تام أثناء عمليات الصيانة—دون أن يحتوي على ميكانيكية فصل تلقائي (Magnetic/Thermal Tripping) للأعطال—فإنه يشترط معيارياً أن تكون السعة الأمبيرية التشغيلية للمفتاح أكبر من أو تساوي تيار المصهر الموضع قبله ($I_{\text{switch}} \geq I_{\text{fuse}}$).

ويظهر التحقق الرياضي تلبية هذا الشرط المعياري بالكامل:

$$I_{\text{switch}} \geq I_{\text{fuse}}$$

$$32 \quad \text{A} \geq 25 \quad \text{A}$$

ثانياً: المواصفات الفنية الهندسية لقواطع العزل المختارة

بناءً على المعايير التصميمية والتحليل الكهربائي المتقدم، يتم توصيف مفاتيح عزل الجانب المستمر هندسياً لإدراجها في وثائق المشروع وجداول الكميات (BOQ) وفق المحددات التالية:

- **نوع الجهاز:** مفتاح قطع وعزل تيار مستمر تحت الحمل (DC Switch-Disconnector / Isolator).
- **آلية الفصل:** عزل مرئي يدوي وآمن مصمم خصيصاً للتطبيقات الكهروضوئية (PV Application).
- **عدد الأقطاب:** ثنائي الأقطاب ($2 - \text{Pole}$) لعزل الخطين الموجب والسالب ($\pm$) بشكل متزامن لقطع القوس الكهربائي بفعالية.
- **الجهد الاسمي المقنن (U_e):** $1000 \quad \text{Vdc}$.
- **التيار الحراري الاسمي المقنن (I_{th}):** $32 \quad \text{A}$.
- **جهد العزل الاسمي (U_i):** $1200 \quad \text{V}$.
- **المعايير المعتمدة:** مطابق للمواصفة الدولية الصارمة **IEC 60947-3** الخاصة بمفاتيح العزل والقطع.

اختيار مانعات الصواعق للجهود العابرة (DC Surge Protective Devices - SPDs)

تخضع عملية اختيار مانعات الصواعق في الجانب المستمر لمعايير اللجنة الكهروتقنية الدولية **IEC 61643-31**، حيث تهدف إلى حماية العاكس والألواح من ضربات الصواعق غير المباشرة أو الجهود العابرة (*Switching Surges*) الناتجة عن عمليات الفصل والوصل بالشبكة. ويتم التوصيف الفني للمانع بناءً على المعايير التصميمية التالية:

أولاً: تحديد فئة المانع (SPD Type)
نظراً لوقوف مصفوفة الألواح فوق سطح منشأة حيوية (بنك) وفي بيئة مفتوحة، يتم اختيار مانع صواعق وهو النمط الأكثر شيوعاً وفعالية لحماية العوازل الداخلية للعاكس من **النمط الثاني (Type 2)**، الحث الكهرومغناطيسي الناتج عن الصواعق القريبة.

الجدير بالذكر:

بناءً على وجود نظام حماية خارجي من الصواعق (*SPD Type*) يتم تحديد فئة أو نمط المانع (*Lightning Protection System - LPS*) للمنشأة:

- **النمط الأول (Type 1 / Class I):** يُختار إذا كانت المنشأة مزودة بنظام صواعق خارجي (مانعة صواعق قاسية/صاري)، أو إذا كانت المحطة في منطقة مفتوحة ذات معدل صواعق مرتفع جداً. يعتمد على تحمل تيار نزول الصاعقة المباشر (I_{imp}).
- **النمط الثاني (Type 2 / Class II):** يُختار لحماية العاكس والألواح من ضربات الصواعق غير المباشرة أو الجهود العابرة الناتجة عن عمليات الفصل والوصل بالشبكة (Switching Surges). وهو النمط الأكثر شيوعاً داخل صناديق تجميع الـ DC.
- **النمط الهجين (Type 1+2):** يُدمج في جهاز واحد ليوفر حماية ضد الضربات المباشرة وغير المباشرة معاً.

ثانياً: حساب أقصى جهد تشغيل مستمر (U_{cpv})
يُعد هذا المعامل الأكثر حرجاً؛ حيث يجب أن يتحمل المانع جهد السلسلة الأقصى دون انهيار. حيث تفرض الأكواد الهندسية ألا يقل جهد المانع عن 110% من جهد المصفوفة الأقصى:

$$U_{cpv} \geq 1.1 \times V_{oc_max_string}$$

وبما أن أقصى جهد دائرة مفتوحة للسلسلة عند درجة حرارة (0°C) هو **736.32 V** :

$$U_{cpv} \geq 1.1 \times 736.32V = 809.95 \text{ V}$$

بناءاً عليه يتم اعتماد مانعة صواعق بجهد تشغيل قياسي **1000 Vdc}** لضمان توافق تام مع جهد نظام العاكس المعتمد (1100 فولت).

ثالثاً: مستوى حماية الجهد (U_p) وتنسيق العزل
يجب أن يكون الجهد الذي "يسمح" المانع بمروره أثناء التفريغ (U_p) أقل من جهد تحمل عوازل العاكس النبضي (U_w):

- بما أن جهد المصفوفة لا يتجاوز 1000 فولت، فإن دخل العاكس يُصنف ضمن فئة الجهد الزائد الثانية (**OVC II**) بجهد تحمل نبضي معيري قدره **4 kV**
- بتطبيق هامش الأمان (20%):

$$\text{U_p} \leq 0.8 \times U_w = 0.8 \times 4 \text{ kV} = 3.2 \text{ kV}$$

- لذا تم اختيار مانع بـ ($U_p \leq 3.2$ kV) لضمان عدم تعرض الدوائر الإلكترونية داخل عاكس Huawei للتلف.

كيف تستنتج القيمة U_w من الجدول المعياري؟

تُقسم هذه المعايير أطراف العاكس الشمسي إلى فئتين من فئات الجهد الزائد (OVC):

- **جانب التيار المستمر (DC Side):** يُصنف هندسياً ضمن الفئة الثانية للجهد الزائد (Overvoltage Category II - OVC II).
- **جانب التيار المتردد (AC Side):** يُصنف ضمن الفئة الثالثة للجهد الزائد (Overvoltage Category III - OVC III) لأنه يتصل مباشرة بشبكة التوزيع المعرضة لعمليات الفصل والوصل والضربات الجوية.

تحدد المواصفة قيمة الجهد النبضي القياسي، OVC بمعرفة الجهد التشغيلي للنظام وفئة الـ الواجب على المعدة تحمله:

- القيمة القياسية لجهد **أنظمة الـ DC فولت 1000 بجهد اسمي حتى (OVC II تحت فئة):** التحمل النبضي هي $U_w = 4000\ \mathrm{V}$ (أي $4\ \mathrm{kV}$).
- القيمة القياسية لجهد **أنظمة الـ DC فولت 1500 بجهد اسمي الحديثة (OVC II تحت فئة):** التحمل النبضي هي $U_w = 6000\ \mathrm{V}$ (أي $6\ \mathrm{kV}$).
- القيمة القياسية لجهد التحمل **جانب الـ AC فولت 230/400 بجهد شبكة (OVC III تحت فئة):** النبضي لعوازل مخرج العاكس هي $U_w = 4000\ \mathrm{V}$ (أي $4\ \mathrm{kV}$).

رابعاً: سعة تيارات التفريغ (I_n & $I_{\max}$)

لضمان صمود المانع أمام النبضات المتكررة، تم توصيفه بالقيم المعيارية التالية:

- **تيار التفريغ الاسمي (I_n):** لا يقل عن $20\ \mathrm{kA}$.
- **تيار التفريغ الأقصى ($I_{\max}$):** يصل إلى $40\ \mathrm{kA}$.
- **تيار القصر للمانع (I_{scpv}):** يجب أن يكون أكبر من تيار قصر المصفوفة ($14.46\ \mathrm{A}$)، وهو ما يتوفر في المانعات المختارة التي تتحمل تيار قصر داخلي يصل لـ $1000\ \mathrm{A}$.

داخل صندوق حماية التيار المستمر، مع MPPT لكل متعقب **Type 2** أي سيتم تركيب مانعة صواعق ربطها ببارة التأريض النحاسية بمسار لا يتجاوز طوله **0.5 متر** لتقليل مفاقيد الجهد الحثية أثناء التفريغ.

توصيف صندوق حماية وتوزيع التيار المستمر (DC Protection Box)

يُمثل صندوق حماية التيار المستمر الوحدة المركزية التي تجمع كافة عناصر الأمان الميكانيكية والكهربائية لجانب المصفوفة الكهروضوئية. وبما أن التصميم المعتمد في المشروع يعتمد على إدخال المستقلة في العاكس، فإن وظيفة هذا الصندوق تتحول من MPPT السلاسل مباشرة إلى مداخل الـ "تجميع التيارات" إلى "تنسيق الحمايات" وتوفير نقطة عزل آمنة وقريبة من المصفوفة قبل انتقال الطاقة إلى العاكس.

المواصفات الميكانيكية والبيئية للصندوق

نظراً لوضع الصندوق في بيئة خارجية مفتوحة فوق سطح البنك، تم توصيفه وفق المعايير التالية لضمان الصمود التشغيلي وطول العمر التشغيلي:

- **درجة الحماية (IP Rating):** لضمان عزل تام ضد الغبار **IP66** يتم اعتماد صندوق بدرجة حماية لا تقل عن المعتمد Huawei ونفاذ المياه تحت الضغط، مما يجعله متوافقاً مع معايير حماية عاكس.
- **المادة المصنعة:** يُصنع الغلاف من مادة "البولي كربونيت (Polycarbonate)" عالية الجودة، المقاومة للأشعة فوق البنفسجية (UV-Stabilized) وغير القابلة للاشتعال، مع توفير عزل كهربائي من **الدرجة الثانية (Class II)** لزيادة أمان الصدمات.
- **إدارة الكابلات:** يُزود الصندوق بفتحات مجهزة بـ "جلاندات (Cable Glands)" محكمة أو وصلات **MC4** مدمجة لضمان إحكام الإغلاق عند نقاط دخول وخروج كابلات السلاسل ($4\ \mathrm{mm}^2$).

التوزيع الداخلي والمكونات

يتم تنظيم المكونات التي تم حسابها في الفقرات السابقة داخل الصندوق على سكة حديدية (DIN Rail) لضمان سهولة الصيانة كالتالي:

1. **قسم المصهرات:** يضم **6 حوامل مصهرات** (لقطبي السلاسل الثلاث)، مزودة بمصهرات سعة gPV وجهد 25 A 1000 Vdc.
2. **قسم قواطع الفصل:** يحتوي على القواطع ثنائية الأقطاب (2-Pole DC MCB) التي تم اختيارها؛ ثلاث قواطع كل منها بسعة 32 A لكل سلسلة داخلة للعاكس.
3. **قسم الحماية العابرة (SPD):** يتضمن مانعات الصواعق (Type II) المخصصة لكل متعقب، مع ربطها ببارة تأريض نحاسية داخلية تتصل مباشرة بنظام التأريض العام للمبنى.

المبررات الهندسية لاعتماد صندوق حماية خارجي

على الرغم من احتواء عاكس Huawei 25KTL على منظومات حماية وتأمين داخلية، إلا أن الاعتماد على صندوق حماية وتجميع خارجي يظل ضرورة هندسية وتشغيلية حتمية؛ حيث يضمن تحقيق العزل الميكانيكي الفعلي بمقربة من الحقل الكهروضوئي، مما يؤمن خلو المسارات الطويلة للكابلات من أي جهد كهربائي خطر أثناء إجراء عمليات صيانة العاكس. كما تمثل مصهراته الخارجية خط الدفاع الأول فائق الاستجابة لامتصاص وعزل تيارات الأعطال العنيفة قبل نفاذها إلى المكونات الإلكترونية الداخلية الحساسة، بالتوازي مع إتاحة غطائه الشفاف ميزة المعاينة البصرية الفورية التي تُمكّن الفنيين من التحقق من سلامة مؤشرات مانعات الصواعق (SPD status) بسهولة، ودون الحاجة لفتح هيكل العاكس نفسه.

جانب التيار المتردد (AC Side)

حساب التيار الاسمي والأقصى للمخرج المتردد للعاكس (I_{AC})
يُعد الحساب الدقيق للتيارات المترددة الناتجة عن العاكس الشمسي عند مخرجه ثلاثي الأطوار (Three-Phase AC Output) الخطوة التأسيسية الحرجة والركيزة الأساسية التي يُبنى عليها تحجيم واختيار كافة مكونات لوحة الربط المتردد؛ بما يشمل المقطع العرضي الفيزيائي لكابلات الطاقة **(AC Cables Sizing)** وسعات قواطع الحماية من التيار الزائد وقصر الدارة (AC Circuit Breakers).

تستند هذه الحسابات إلى القوانين الفيزيائية الحاكمة لأنظمة التيار المتردد ثلاثية الأطوار المتزنة (Balanced Three-Phase Systems)، حيث يتم استخراج التيارات عبر تحليل استطاعة العاكس الاسمية المحددة من **(Max. Apparent Power)** واستطاعته الظاهرية القصوى **(Rated Active Power)** الفعالة قِبل الشركة المصنعة ربطاً بجهد الشبكة الكهربائية المتوفر في الموقع.

أولاً: المحددات التصميمية ومعطيات الدخل (Design Parameters)
لإجراء الحسابات الرياضية، يتم اعتماد الثوابت والمحددات التقنية الخاصة بالعاكس الذكي المعتمد في المشروع من طراز (**Huawei SUN2000-25KTL-M5**) وفقاً لـ (Datasheet) الرسمية:

- **الاستطاعة الاسمية المترددة الفعالة ($P_{\text{AC-rated}}$):** $25,000\ \text{W} = 25\ \text{kW}$.
- **الاستطاعة الظاهرية المترددة القصوى ($S_{\text{AC-max}}$):** $27,500\ \text{VA} = 27.5\ \text{kVA}$.
- **جهد الخط الاسمي بين طورين ($V_{\text{L-L}}$):** $400\ \text{V}$ (ثلاثي الأطوار متزن).
- **معامل القدرة التصميمي ($\cos\varphi$):** يُفترض مساوياً للواحد الصحيح ($\cos\varphi = 1$) عند ضخ الحد الأقصى من الطاقة الفعالة، وهو المعيار المعتمد في حساب التيارات الاسمية.

ثانياً: الحساب الرياضي للتيار الاسمي المتردد ($I_{\text{AC-rated}}$)
قيمة التيار الكهربائي التشغيلي المستمر الذي يضخه العاكس (Rated AC Current) يمثل التيار الاسمي إلى الشبكة تحت ظروف التشغيل العادية وبقدرته المقننة. ويخضع لحساب القدرة الفعالة في الأنظمة ثلاثية الأطوار وفق العلاقة الرياضية التالية:

$$P_{\text{AC-rated}} = \sqrt{3} \times V_{\text{L-L}} \times I_{\text{AC-rated}} \times \cos\varphi$$

وبإعادة ترتيب المعادلة لعزل متغير التيار الاسمي ($I_{\text{AC-rated}}$):

$$I_{\text{AC-rated}} = \frac{P_{\text{AC-rated}}}{\sqrt{3} \times V_{\text{L-L}} \times \cos\varphi}$$

بالتعويض العددي المباشر بالقيم المعتمدة:

$$I_{\text{AC-rated}} = \frac{25,000\ \text{W}}{\sqrt{3} \times 400\ \text{V} \times 1.0}$$

$$I_{\text{AC-rated}} = \frac{25,000}{692.82} = 36.08\ \text{A}$$

وبناءً على هذه النتيجة، فإن التيار الاسمي التشغيلي المار في كل طور من الأطوار الثلاثة لخط مخرج العاكس يبلغ **36.08 Ampere**.

ثالثاً: الحساب الرياضي لتيار المخرج الأقصى ($I_{\text{AC-max}}$)
العتبة العليا للتيار الذي يمكن للعاكس أن يضخه (Maximum AC Current) يمثل تيار المخرج الأقصى بصفة مستمرة في حالات ذروة الإشعاع أو عند انخفاض جزئي في جهد الشبكة لتعويض القدرة، ويُحسب بالاعتماد على الاستطاعة الظاهرية القصوى للعاكس ($S_{\text{AC-max}}$) التي تعكس الحدود الفيزيائية المطلقة لدوائر أشباه الموصلات الداخلية (IGBTs)، وفق المعادلة التالية:

$$S_{\text{AC-max}} = \sqrt{3} \times V_{\text{L-L}} \times I_{\text{AC-max}}$$

وبإعادة ترتيب المعادلة لحساب التيار الأقصى ($I_{\text{AC-max}}$):

$$I_{\text{AC-max}} = \frac{S_{\text{AC-max}}}{\sqrt{3} \times V_{\text{L-L}}}$$

بالتعويض العددي المباشر:

$$I_{\text{AC-max}} = \frac{27,500 \text{ VA}}{\sqrt{3} \times 400 \text{ V}}$$

$$I_{\text{AC-max}} = \frac{27,500}{692.82} = 39.69 \text{ A}$$

وبناءً على هذه النتيجة الرياضية، فإن التيار المتردد الأقصى المطلق الذي يمكن أن يتدفق عبر خط مخرج العاكس، ويجب على النواقل (الكابلات) وأجهزة الحماية الصمود أمامه دون تفعيل خاطئ أو إجهاد حراري يبلغ **39.69 Ampere**.

رابعاً: مطابقة التحقق الهندسي

للتحقق من دقة الحسابات الرياضية المنجزة أكاديمياً وضمان خلو التصميم من الأخطاء التراكمية، يتم مطابقتها مع وثيقة المواصفات الفنية الرسمية المستخلصة من شركة (**Huawei**):

- تحت بند تيار الخرج الأقصى **SUN2000-25KTL-M5** بالرجوع إلى جدول الخصائص الكهربائية للعاكس طراز (**Max. Output Current**)، يُلاحظ أن الشركة المصنعة حددت هذه القيمة بدقة عند **39.7 A** عند جهد تشغيلي معتمد 400 V.
- بمقارنة النتيجة المحسوبة نظرياً (39.69 A) مع القيمة المرجعية للمصنع (39.7 A)، نجد توافقاً مطلقاً ونسبة خطأ تكاد تكون معدومة ($\leq 0.025\%$)، مما يمنح الحسابات موثوقية هندسية كاملة.

خامساً: الأثر التصميمي والتطبيق العملي للحسابات

تُشكل القيم المستخرجة المحدِّد الحاكم للخطوات اللاحقة في هذا الطور كالآتي:

1. **تحجيم الكابل المتردد (AC Cable Sizing):** سيتم اختيار كابل مخرج العاكس بحيث تكون سعته الأمبيرية المصححة (I_z) أعلى من تيار الخرج الأقصى ($I_{\text{AC-max}} = 39.69$ A) مع تطبيق معاملات التصحيح الحراري لظروف السطح بالموقع.
2. **اختيار قاطع الحماية (AC Circuit Breaker):** تخضع سعة القاطع الاسمي (I_n) للمتراجحة القياسية لضمان الانتقائية ومنع الفصل العشوائي:

$$I_{\text{AC-max}} \leq I_n \leq I_z$$

وبناءً عليه، يمثل تيار 39.69 A الحد الأدنى المطلق لمعايرة وحدة الفصل الحراري للقاطع (Thermal Trip Entry).

تحجيم واختيار قاطع الحماية المصغر بمخرج العاكس (Inverter Output MCB Sizing)

تُعد عملية اختيار قاطع الحماية للجانب المتردد (AC Circuit Breaker) خطوة محورية لضمان الحماية الفعالة ضد تيارات الحمل الزائد (Overload) وتيارات القصر (Short Circuit). ويستند اختيار هذا القاطع الرئيسي إلى معايير أساسية تشمل: السعة الاسمية (Nominal Rating)، وفئة المنحنى الزمني-الأمبيري (Trip Curve Class)، وقدرة الفصل (Breaking Capacity).

أولاً: تحديد السعة الاسمية للقاطع (I_n)

وفقاً للمعايير الهندسية الكهربائية الحاكمة للتعامل مع الأحمال المستمرة (Continuous Loads) -مثل العواكس الشمسية التي تعمل بكامل طاقتها لفترات زمنية طويلة متواصلة- يجب تطبيق معامل أمان لا يقل عن 1.25. يهدف هذا المعامل المعتمد إلى ضمان استقرار التشغيل على المدى الطويل وتجنب الفصل غير المبرر (Nuisance Tripping) الناتج عن الاحترار الطبيعي للمكونات الحرارية الداخلية للقاطع نتيجة مرور التيار المستمر لفترات طويلة.

بناءً على تيار الخرج المتردد الأقصى المحسوب سابقاً للعاكس الذكي طراز (Huawei SUN2000-25KTL-M5) والذي يبلغ ($I_{\text{AC-max}} = 39.69\ \text{A}$)، يتم تطبيق متراجحة التصميم التالية:

$$I_n \geq I_{\text{AC-max}} \times 1.25$$

بالتعويض العددي المباشر:

$$I_n \geq 39.69\ \text{A} \times 1.25 = 49.61\ \text{A}$$

بسعة اسمية قياسية (Standard Rating) متوفرة في السوق وتبلغ (MCB) تأسيسياً على هذه النتيجة الرياضية، يتم اختيار قاطع دورة مصغر:

$$I_n = 50\ \text{A}$$

حيث توفر هذه السعة المقننة الحماية المطلوبة للموصلات مع الحفاظ على الهامش التشغيلي الآمن والمستدام للمنظومة دون التسبب في إجهاد حراري غير مبرر لنظام الحماية.

ثانياً: اختيار فئة المنحنى الزمني-الأمبيري (Trip Curve Type)

لضمان التوافق الهندسي الكامل مع الخصائص التشغيلية للعاكس عند الإقلاع والربط بالشبكة، تم اعتماد قواطع من **الفئة (Type C)**. وتتميز هذه الفئة بخصائص فصل مغناطيسي لحظي تقع ضمن النطاق من (5 إلى 10 أضعاف التيار الاسمي I_n)، وهو ما يعادل تياراً تتراوح قيمته بين ($250\ \text{A}$ و $500\ \text{A}$) في هذا التصميم.

تكمن الأهمية التطبيقية لاعتماد منحنى الفئة (C) في المحددات الهندسية التالية:

- **تحمل تيارات العبور والبدء (Inrush Currents):** يمتلك العاكس مكثفات داخلية ضخمة وفلاتر خرْج (C) تسحب تياراً لحظياً مرتفعاً جداً عند لحظة المزامنة والربط بالشبكة العامة؛ ويضمن منحنى الفئة صمود القاطع أمام هذه النبضات العابرة فائقة القصر دون حدوث فصل خاطئ للمنظومة.
- **سرعة الاستجابة للأعطال الحقيقية:** يوفر القاطع حماية فائقة وفصلاً فورياً وموثوقاً في حال حدوث تماس كهربائي مباشر (قصر) في كابل الجانب المتردد لحماية المعدات الحساسة والأفراد.

ثالثاً: تحديد سعة الفصل أو قدرة القطع (Breaking Capacity)

تمثل سعة الفصل (Breaking Capacity) المقدرة بالكيلو أمبير (kA) أقصى قيمة لتيار القصر (Short-Circuit Current) التي يمكن للقاطع الميكانيكي التعامل معها وفصلها بأمان دون تعرضه للتلف المادي الكلي أو تلاحم ملامساته الداخلية.

بناءً على ربط المنظومة بلوحة التوزيع الرئيسية للمنشأة وبما يتوافق مع المعايير القياسية العالمية (مثل IEC 60947-2 أو IEC 60898-1)، تم اعتماد قدرة قطع للقاطع تبلغ:

$$\text{Breaking Capacity} = 10\ \text{kA}$$

ويعود هذا الاختيار إلى محددين أساسيين:

- **تأمين المنظومة ضد أعطال الشبكة:** القدرة العالية على مجابهة تيارات القصر العنيفة المتوقع تدفقها من الشبكة العامة باتجاه نقطة الربط الكهربائي للمشروع في حالات الأعطال الجسيمة دون تدمير القاطع ميكانيكياً.
- **الحماية الاستباقية لكروت العاكس:** المساهمة في سرعة كبح وعزل التيارات التدميرية قبل وصولها إلى أشباه الموصلات الحساسة (IGBTs) والمكونات الإلكترونية الدقيقة داخل العاكس الذكي، مما يضمن سلامة واستدامة المنشأة بالكامل.

اختيار وضبط قاطع الحماية المصبوب الرئيسي (Main MCCB Selection & Settings)

تعتمد البنية الهندسية لحماية الجانب المتردد في هذا التصميم على نظام حماية متدرج؛ حيث يركب قاطع فرعي مصغر (MCB) في علبة توزيع العاكس (ACDB)، **بينما يتم حماية وتأمين نقطة الاتصال بالباسبارات العمومية داخل لوحة التوزيع الرئيسية للمنشأة (MDB) بواسطة قاطع مصبوب**

يأتي هذا الاختيار استجابةً للمحددات التشغيلية عند **رئيسي (Molded Case Circuit Breaker - MCCB)**. نقطة الربط مع الشبكة العامة والتي تتسم بارتفاع مستويات تيارات الأعطال الحتمية، مما يفرض استخدام قاطع ذي سعة قطع مرتفعة وقابلية ضبط دقيقة للمحددات الحرارية والمغناطيسية بما يضمن عزل العطل موضعياً وتحقيق الانتقائية الكهربائية المطلوبة.

أولاً: الحساب والتحجيم الحراري لحماية الحمل الزائد (Overload Protection - I_r)

يجب أن يمتلك قاطع الـ MCCB وحدة فصل مغناطيسية حرارية قابلة للضبط (Adjustable Thermal-Magnetic Trip Unit) لتأمين تيار فصل حراري دقيق يتوافق مع تيار التصميم وكفاءة الكابل المختار (16mm^2). تخضع صياغة الضبط الحراري للشرط المعياري التالي:

$$I_{\text{design}} \leq I_r \leq I_z$$

حيث أن:

- I_{design}: تيار التصميم الأقصى للعاكس ويساوي $39.69\ \text{A}$.
- I_r: تيار الضبط الحراري لقاطع الحماية المصبوب (MCCB).
- I_z: السعة الأمبيرية المستمرة للكابل المختار وتحت الظروف التشغيلية.

ثانياً: الضبط المغناطيسي لحماية التيار الزائد والتماس (Short-Circuit Protection - I_m)

ولمنع الفصل المفاجئ الناتج عن التيارات العابرة المرافقة لإقلاع بعض الأحمال الحثية الضخمة في المنشأة أو تذبذبات جودة القدرة، يتم ضبط عتبة الفصل المغناطيسي للزمن القصير وفق منحنى التنسيق القياسي للـ MCCB عند القيمة:

$$I_m = 10 \times I_r$$

$$I_m = 10 \times 50\ \text{A} = 500\ \text{A}$$

هذا يعني أنه إذا تجاوز أي تيار عطل عابر قيمة $500\ \text{A}$ (مثل حدوث تماس مباشر بين الأطوار)، فإن القاطع سيفصل لحظياً وبزمن استجابة تزامني تقع قيمته ضمن النطاق ($\leq 40\ \text{ms}$).

ثالثاً: تحديد سعة القطع الاسمية للأعطال (Ultimate Short-Circuit Breaking Capacity - I_{cu})

تُمثل سعة القطع المعيار الأهم في التفريق بين قواطع الـ MCB والـ MCCB. نظراً لأن القاطع الرئيسي سيرتبط فيزيائياً بالباسبارات المغذاة من محول الشبكة العامة مباشرة، فإن تيار القصر المحتمل للشبكة عند هذه النقطة ($I_{\text{sc_grid}}$) يكون مرتفعاً جداً.

لضمان قدرة القاطع على إخماد القوس الكهربائي العنيف (Arc Extinction) بأمان ودون انفجار فيزيائي لهيكل الحماية، يتم توصيف سعة القطع الحجمية للقاطع لتكون:

$$I_{\text{cu}} \geq 25\ \text{kA}$$

حساب واختيار كابل الطاقة المتردد الرئيسي (AC Main Cable Sizing)

الركيزة التشغيلية **(AC Main Cable)** يُمثل اختيار المقطع العرضي الفيزيائي لكابل الطاقة المتردد الرئيسي الأساسية لربط مخرج العاكس الشمسي بلوحة التوزيع المركزية. ويخضع هذا الاختيار لمحددات فنية صارمة توازن بين الكفاءة الاقتصادية والأمان التشغيلي، وضمان استمرار تدفق القدرة دون مفاقيد أومية عالية أو خطر الانهيار الحراري. ولتحقيق ذلك، يتم تطبيق منهجية هندسية متكاملة تعتمد على خمس مراحل متسلسلة وفقاً للمواصفات العالمية وبالمطابقة مع كتالوج شركة السويدي للكابلات لجهد $0.6/1\ \text{kV}$ وبأطوار متزنة.

أولاً: تطبيق قاعدة التنسيق والتراتب الحسابي (The Golden Rule of Coordination)

لضمان التنسيق والتراتب الانتقائي الصحيح لحماية النواقل من التيارات الزائدة وفقاً لما تم تأصيله في الفصل التاسع، يجب أن تخضع السعة الأمبيرية المصححة للكابل وعلاقتها مع قاطع الحماية والتيار التصميمي للمتراجحة الرياضية الحاكمة التالية:

$$I_z' \geq I_n \geq I_{\text{AC-max}}$$

حيث إن المحددات الثابتة للمنظومة من الفقرات السابقة هي:

- **التيار الأقصى المستمر للعاكس ($I_{\text{AC-max}}$):** تم حسابه في الفقرات السابقة وبلغ $39.69\ \text{A}$ (المطابق لبيانات مصنع هواوي $39.7\ \text{A}$).
- **السعة الاسمية المقننة للقاطع المتردد المصغر (I_n):** تم تحديدها في الفقرات السابقة عند ($1.25 \times I_{\text{AC-max}}$) السعة القياسية المقدرة بـ $50\ \text{A}$ بعد أخذ معامل الأمان بعين الاعتبار.
- **السعة الأمبيرية المصححة للكابل (I_z'):** القدرة الفعلية للكابل على تمرير التيار بعد تطبيق معاملات التصحيح الحراري والبيئي.

بناءً على ذلك، تصبح حدود المتراجحة المستهدفة:

$$I_z' \geq 50\ \text{A} \geq 39.69\ \text{A}$$

ثانياً: تحديد السعة الأمبيرية المرجعية والمصححة من كتالوج السويدي

تم اعتماد كابل نحاسي متعدد النوى، رباعي الأقطاب **(4-Core)**، معزول بمادة البولي إيثيلين التشابكي (**XLPE**) برتبة جهد $0.6/1\ \text{kV}$، وهو الخيار المعياري (**PVC**) وبغلاف خارجي من الكلوريد متعدد الفاينيل (**PVC**) الأكثر كفاءة حرارياً (يتحمل حرارة تشغيلية للموصل تصل إلى $90°\text{C}$).

تتم عملية تمديد الكابل داخل قنوات حماية **(Conduits/Trunking)** ممددة في الهواء الطلق فوق سطح المنشأة ومحملة على حاملات كابلات، مما يجعلها عرضة للظروف المناخية القاسية صيفاً.
ولحساب السعة الأمبيرية الفعلية (I_z')، يتم تطبيق معادلة التصحيح التالية:

$$I_z' = I_{\text{base}} \times k_1 \times k_2$$

حيث:

- I_{base}: السعة الأمبيرية المرجعية للكابل عند الظروف المعيارية ($30°\text{C}$ في الهواء) مستخلصة من الصفحة 36 في كتالوج السويدي لكابلات الجهد المنخفض **(4-core cables - CU/XLPE/PVC)**.
- k_1: معامل التصحيح الحراري **(Temperature Derating Factor)** لمادة الـ XLPE عند درجة حرارة محيطة قصوى متوقعة على السطح صيفاً تبلغ $45°\text{C}$، وحسب جداول الكود القياسي وكتالوج السويدي فإن $k_1 = 0.87$.
- k_2: معامل تصحيح طريقة التمديد والتجميع **(Grouping Factor)**، وبافتراض تمديد كابل العاكس بشكل منفرد دون مجاورة كابلات طاقة أخرى، فإن $k_2 = 1.0$.

وللوصول إلى المقطع الفيزيائي الأمثل، يتم اختبار مقطعين متتاليين هندسياً ومقارنتهما:

1. اختبار مقطع الكابل 10mm^2:

- بالرجوع لكتالوج السويدي (ألقي نظرة على الملحق "ت")، السعة الاسمية في القنوات/الهواء للمقطع 10mm^2 هي: $I_{\text{base}} = 75\ \text{A}$.
- حساب السعة المصححة: $I_z' = 75\ \text{A} \times 0.87 \times 1.0 = 65.25\ \text{A}$.
- التحقق من متراجحة التنسيق: هل $65.25\ \text{A} \geq 50\ \text{A}$؟ **نعم، محققة**.

2. اختبار مقطع الكابل 16mm^2:

- بالرجوع لكتالوج السويدي، السعة الاسمية في القنوات/الهواء للمقطع 16mm^2 هي: $I_{\text{base}} = 98\ \text{A}$.
- حساب السعة المصححة: $I_z' = 98\ \text{A} \times 0.87 \times 1.0 = 85.26\ \text{A}$.
- التحقق من متراجحة التنسيق: هل $85.26\ \text{A} \geq 50\ \text{A}$؟ **نعم، محققة بهامش أمان حراري أعلى**.

ثالثاً: هبوط الجهد المتردد

تفرض المعايير الأكاديمية قيوداً صارمة على هبوط الجهد في جانب الـ AC؛ وذلك لأن المقاومة الأومية المرتفعة للكابل تؤدي إلى حدوث ظاهرة ارتفاع جهد العاكس (Voltage Rise) عند نقطة مخرجه مقارنة

بجهد الشبكة ($V_{\text{inverter}} = V_{\text{grid}} + \Delta V$)، وتضخم هذه القيمة يجبر العاكس على الفصل الآلي لحماية نفسه من ارتفاع الجهد (Overvoltage Tripping).

تم تحديد طول المسار الفيزيائي للكابل من العاكس إلى لوحة الربط بمسافة تصميمة قدرها: $L = 30 \quad \text{meters}$. وبما أن العاكس يضخ القدرة بمعامل قدرة يقترب من الواحد الصحيح ($\cos(\varphi) = 1.0$) في ذروة الإنتاج، فإن المركبة الحثية تصبح مهملة، وتعتمد الحسابات بشكل أساسي على المقاومة الأومية المترددة للكابل عند درجة حرارة التشغيل القصوى ($90°\text{C}$).

تُحسب قيمة هبوط الجهد للنظام ثلاثي الأطوار المتزن وفق العلاقة الحاكمة:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \times I_{\text{AC-max}} \times L \times R_{\text{AC}}}{1000}$$

النسبة المئوية لهبوط الجهد تُحسب بالنسبة لجهد الخط الاسمي ($V_{L-L} = 400 \quad \text{V}$):

$$\%\Delta V = \left(\Delta \frac{V}{V_{L-L}}\right) \times 100\%$$

نقوم بالتعويض الرياضي للمقطعين للمقارنة:

1. تقييم هبوط الجهد للمقطع 10mm^2:

- المقاومة المترددة للكابل عند $90°\text{C}$ من كتالوج السويدي (ألقي نظرة على الملحق "ت"): $R_{\text{AC}} = 2.19 \frac{\Omega}{\text{km}}$.
- حساب هبوط الجهد الفعلي:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \times 39.69 \quad \text{A} \times 30 \quad \text{m} \times 2.19 \frac{\Omega}{\text{km}}}{1000} = \frac{1.732 \times 39.69 \times 30 \times 2.19}{1000} = 4.516 \quad \text{V}$$

- حساب النسبة المئوية:

$$\%\Delta V = \left(4.516 \frac{\text{V}}{400} \quad \text{V}\right) \times 100\% = 1.13\%$$

على الرغم من أن نسبة 1.13% تقع ضمن الحدود العامة للأكواد الكهربائية ($\leq 3\%$)، إلا أنها تتجاوز الحد الأكاديمي الصارم والموصى به للمنظومات الشمسية عالية الكفاءة والتي تُفضل أن لا يتجاوز هبوط الجهد فيها حاجز $\leq 1\%$ لتقليص الهدر الطاقي ومنع فصل العاكس الفجائي.

2. تقييم هبوط الجهد للمقطع 16mm^2:

- المقاومة المترددة للكابل عند $90°\text{C}$ من كتالوج السويدي (صفحة 36): $R_{\text{AC}} = 1.39\,\Omega/\text{km}$.
- حساب هبوط الجهد الفعلي:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \times 39.69 \quad \text{A} \times 30 \quad \text{m} \times 1.39 \frac{\Omega}{\text{km}}}{1000} = \frac{1.732 \times 39.69 \times 30 \times 1.39}{1000} = 2.867 \quad \text{V}$$

- حساب النسبة المئوية:

$$\%\Delta V = \left(2.867 \frac{\text{V}}{400} \quad \text{V}\right) \times 100\% = 0.717\%$$

تحقق هذه النتيجة النسبة المثالية المستهدفة أكاديمياً ($\%\Delta V = 0.717\% \leq 1\%$)، مما يضمن كفاءة نقل طاقة قصوى وتوفير استقرار كامل لجهد الخرج المتردد للعاكس.

رابعاً: التحقق من الصمود الحراري للكابل ضد تيارات القصر اللحظية المتوقعة (Short-Circuit Capacity)

يجب التحقق من قدرة الناقل المختار على تحمل الإجهاد الحراري العالي الناتج عن تدفق تيار القصر اللحظي القادم من الشبكة في حال حدوث عطل، وذلك لفترة زمنية تكفي لاستجابة وفصل القاطع دون ذوبان العازل.

حيث ترتفع الحرارة اللحظية للموصل (XLPE) تُحسب السعة الحرارية للقصر للكابل النحاسي المعزول بمادة (250°C من 90°C إلى) وفقاً للمواصفة العالمية **IEC 60724** وعبر المعادلة التالية:

$$I_{\text{sc_cable}} = \frac{k \times S}{\sqrt{t}}$$

حيث:

- S: المقطع الفيزيائي للناقل المستهدف اختياره (16mm^2).
- k: معامل الثابت الحراري للمادة المقاومة، وحسب مواصفات السويدي والمعيار الدولي للنحاس المعزول بـ XLPE فإن $k = 143$.
- t: زمن بقاء القصر واختراق العطل قبل الفصل، ويؤخذ هندسياً لزمن الفصل القياسي الافتراضي كحد أقصى بأمان صلب مقداره $t = 1 \quad \text{Second}$.

بالتعويض الرياضي للمقطع المختار 16mm^2:

$$I_{\text{sc_cable}} = \frac{143 \times 16}{\sqrt{1}} = 2288 \quad \text{A} = 2.288 \quad \text{kA}$$

بمقارنة هذه القدرة الحرارية للصمود البالغة $2.29\ \text{kA}$ مع تيار القصر المتوقع في لوحات الربط لهذه القدرة والمحمي بواسطة قاطع ذو سعة قطع (Breaking Capacity) تبلغ $6\ \text{kA}$ أو $10\ \text{kA}$، نجد أن الكابل يمتلك متانة ميكانيكية وحرارية عالية جداً تضمن عدم تلفه في أجزاء من الثانية التي يقطع فيها المفتاح الآلي الدائرة.

خامساً: القرار الهندسي والتوصيف النهائي للكابل

بناءً على الموازنة المتكاملة بين السعة الأمبيرية المصححة، وهبوط الجهد الأكاديمي، والمقاومة الحرارية لتيارات القصر، تم **استبعاد مقطع الـ 10mm^2** نظراً لارتفاع نسبة هبوط الجهد فيه عن الحدود الأكاديمية المثلى. ووقع الاختيار الهندسي النهائي على **مقطع 16mm^2** كخيار تصميمي آمن ومستدام للمحطة.

جدول التلخيص الفني والمواصفات لكابل الـ AC الرئيسي:

المرجعية والتحقق	التوصيف والقيمة المعتمدة	البند الفني
كتالوج السويدي لكابلات الجهد المنخفض	$4 \times 16\text{mm}^2$ Cu/XLPE/PVC	**طراز الكابل القياسي**
IEC 60502-1 معيار	بولي / (**Cu**) نحاس مجدول راتب (**XLPE**) إيثيلين مشابك	**نوع الموصل والعازل**
عند 30°C في الهواء الطلق (السويدي)	98 Ampere	**السعة الأمبيرية القياسية (I_{base})**
عند 45°C فوق السطح صيفاً	85.26 Ampere	**السعة الأمبيرية المصححة (I'_z)**
ناجح ومطابق تماماً للقاعدة الذهبية	$85.26 \text{ A} \geq 50 \text{ A} \geq 39.69 \text{ A}$	**شرط متراجحة التنسيق**
1% أكاديمي ممتاز أقل من	0.717% أي بنسبة 2.87 V	**هبوط الجهد الفعلي والنسبة**
آمن تماماً بوجود حماية لحظية ≤ 40 ms	2.288 kA لمدة 1 s	**تحمل تيار القصر الحراري (I_{sc})**

Table 1: ملخص نتائج تحجيم وتقييم كابل الطاقة المتردد الرئيسي وحمايته

منظومة القياس ومستشعرات القدرة الذكية

تتطلب هندسة ربط المنظومة الكهروضوئية بشبكة التوزيع الكهربائية العامة اعتماد بنية قياس ومراقبة (Net Metering وفق نظام صافي القياس) متكاملة تحقق المتطلبات التنظيمية لشركات الكهرباء والتوافقية التشغيلية للعاكس الذكي. تنقسم هذه المنظومة إلى ثلاثة عناصر أساسية موصوفة فصيلاً كالتالي:

أولاً: عداد التبادل الطاقي عند نقطة الربط المشترك (Grid-Tie Bi-directional Meter)

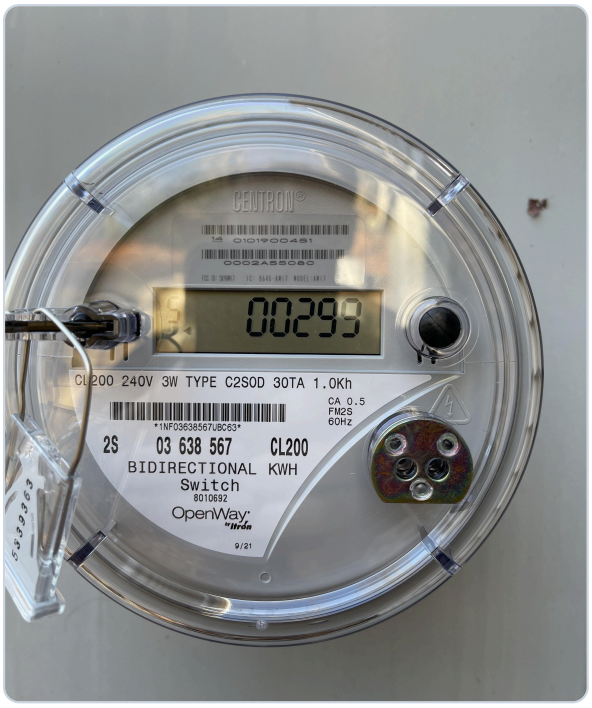

Figure 1: عداد التبادل الطاقي ثلاثي الأطوار للربط المباشر المستخدم عند نقطة الربط المشترك

يُثبّت هذا العداد عند نقطة الحيازة الفاصلة بين المنشأة وشبكة التوزيع العامة (PCC - Point of Common Coupling). ويمتاز هذا العداد ببنية برمجية وسجلّات قياس مزدوجة ومنفصلة تماماً (Dual-Register) للتمييز بين تدفقي الطاقة:

1. **الطاقة المستجرة من الشبكة (Import Energy):** لقياس استهلاك المنشأة ليلاً أو في فترات العجز المغذي.
2. **الطاقة المصدرة للشبكة (Export Energy):** لقياس فائض الإنتاج الكهروضوئي المحقَّق نهاراً بعد كفاية الأحمال الذاتية.

يخضع اختيار سعة العداد للتيار الأقصى الإجمالي للمنشأة (وليس تيار العاكس بمفرده).

نظراً لأن المنشأة تقع ضمن تصنيف الأحمال التجارية/الخدمية المتوسطة، يتم اختيار **عداد تبادلي ذكي ثلاثي الأطوار مصمم للربط المباشر (Direct-Connected Meter)** بسعة تيار اسمية $(10 - 100\ \mathrm{A})$ وجهد اسمي $(230/400\ \mathrm{V})$، مما يضمن تحملاً كاملاً لتيارات الاستهلاك والإنتاج دون خطر الإشباع الحراري.

ثانياً: عداد إنتاج الحقل الكهروضوئي (Generation Meter)

يُدمج هذا العداد على التوالي بين مخرج لوحة الحماية المترددة للعاكس (ACDB) ولوحة التوزيع الرئيسية للمنشأة. وظيفته الأساسية حساب إجمالي الطاقة التراكمية الفِعلية الناتجة عن العاكس الشمسي (Total PV Generation)، وتكمن أهميته الأكاديمية والتشغيلية في استخدامه كمرجع رياضي لحساب معدل أداء المنظومة (Performance Ratio - PR) وتحديد حجم الاستهلاك الذاتي المباشر (Self-Consumption) عبر العلاقة:

$$\text{Self-Consumption} = \text{Total PV Generation} - \text{Exported Energy}$$

بما أن التيار الاسمي للعاكس هو $36.08\ \mathrm{A}$ وتيار التصميم الأقصى للقاطع هو $49.61\ \mathrm{A}$، يتم توصيف هذا العداد من **نوع الربط المباشر ثلاثي الأطوار بسعة قياسية $(20 - 80\ \mathrm{A})$**، مما يحقق معايير الأمان الكهربائي وهامش نمو تشغيلي كافٍ.

Figure 2: منظر أمامي لعداد إنتاج الطاقة الكهروضوئية التراكمية الناتجة عن العاكس الشمسي

Figure 3: منظر جانبي لعداد إنتاج الطاقة الكهروضوئية ثلاثي الأطوار

ثالثاً: مستشعر القدرة الذكي للعاكس (Huawei Smart Power Sensor)

Figure 4: مستشعر القدرة الذكي من هواوي مع محولات التيار مشقوقة القالب الملحقة

لضمان استمرارية التغذية وعدم قطع كابلات الدخل الرئيسية للمنشأة، يُعتمد الطراز المزود **بمحولات تيار مشقوقة القالب (Split-Core Current Transformers - CTs) ($250A/50$ mA) بنسبة تحويل** تُطوق هذه المحولات كابلات التغذية الرئيسية للمنشأة لترسل إشارات تيار منخفضة وآمنة إلى وحدة المعالجة في المستشعر، مما يتيح للعاكس الاستجابة اللحظية وبدقة قياس عالية من الفئة (Class 1). برمجياً في حال فرضت الأكواد المحلية ذلك (Zero-Export) لتغيرات الأحمال وتفعيل خاصية منع التصدير.

ولضمان دقة مراقبة تدفقات القدرة العكسية وتحقيق التوافق مع نظام صافي القياس (Net Metering)، يتم دمج حساس القدرة الذكي **Huawei DTSU666-H** مباشرة بعد العداد التبادلي لشركة الكهرباء، حيث تقوم محولات التيار (CTs) بقراءة صافي التيار المتبادل عند الدخل الرئيسي للمنشأة وإرسال البيانات عبر بروتوكول Modbus/RS485 إلى العاكس الذكي لإدارة القياس والتحكم.

الحماية من الصواعق والتأريض

توصيف أجهزة الحماية من الجهود العابرة (Surge Protection Devices - Type 2 SPD)

تُعد أجهزة الحماية من الجهود الزائدة والعابرة (Surge Protective Devices - SPDs) خط الدفاع التكنولوجي الاستباقي لحماية المكونات الإلكترونية الحساسة (Power Electronics) داخل العاكس الذكي. ونظراً لطبيعة تركيب المصفوفة الكهروضوئية في مكان مفتوح ومرتفع فوق سطح المبنى، فإنها تعمل بمثابة "هوائي" مثالي لالتقاط الحقول الكهرومغناطيسية الناتجة عن ضربات الصواعق غير المباشرة (Indirect Lightning Strikes)، والتي تؤدي إلى تحريض جهود عابرة فائقة (Transient Overvoltages) تنتقل عبر كابلات الـ DC.

لجهود عابرة ناتجة عن عمليات الفصل والوصل (AC Side) بالتوازي مع ذلك، يتعرض جانب التيار المتردد (Switching Surges). لحماية كروت التحكم الدقيقة ومعالجات الديناميكي في الشبكة الكهربائية العامة من الانهيار العازلي الحراري، يخضع (IGBT Inverter Bridges) وجسور الترانزستورات (DSPs) الإشارات الرقمية الخاص بمانعات الصواعق لشبكات الجهد) **IEC 61643-11** التصميم لمتطلبات المعيارين الدوليين (المنخفض و **IEC 60364-7-712**.

أولاً: حماية جانب التيار المستمر (DC Side Surge Protection)

يتعرض مدخلا متعقبات القدرة ($MPPT_1$ و $MPPT_2$) في العاكس لقيم جهود مستمرة تصل في ذروتها شتاءً إلى حدود قريبة من الجهد الأقصى للعاكس البالغ 1100 V. وبناءً على التحليل الفني للعاكس المعتمد **Huawei SUN2000-25KTL-M5**، فقد تم تأكيد دمج مانعات صواعق من **النوع الثاني (Type**

على ناقل الجهد المستمر الداخلي قبل وصوله إلى دوائر (Built-in) بشكل قياسي ومدمج (**2 SPD**) التقطيع.

إلى المحددات الرياضية التالية لضمان الفعالية DC تستند هندسة الحماية في جانب الـ:

1. **جهد التشغيل المستمر الأقصى ($U_{\text{c-DC}}$):** يجب أن يفي بالشرط المعياري بحيث يكون أعلى من أقصى جهد دارة مفتوحة للمصفوفة تحت أسوأ الظروف الحرارية شتاءً ($V_{\text{oc-max}} = 736.32$ V) إجمالي السلسلة المكونة من 13 لوحاً:

$$U_{\text{c-DC}} \geq 1.25 \times V_{\text{oc-max}}$$

وبما أن مانع الصواعق المدمج مصمم لتحمل جهد تشغيلي مستمر U_c يتجاوز 1100 V، فإن هذا الشرط محقق بأمان مطلق.

2. **مستوى حماية الجهد (U_p):** يُمثل الجهد المتبقي (Residual Voltage) الذي يسمح المانع بمروره نحو كروت العاكس أثناء تفريغ نبضة الصاعقة. لضمان سلامة العاكس، يجب أن يكون U_p أقل بكثير من جهد الصمود النبضي للمكونات الداخلية للعاكس (U_w):

$$U_p < U_w \quad (\text{Where } U_w \approx 4 \text{ kV for 1100 V Inverters})$$

يضمن المانع المدمج حد جهد المخرجات العابرة عند مستوى $U_p \leq 3.5$ kV، مما يحيد خطر تدمير كروت الـ MPPT.

ثانياً: حماية جانب التيار المتردد (AC Side Surge Protection)

يرتبط مخرج العاكس ثلاثي الأطوار بـ "لوحة الربط المتردد الرئيسية" ومنها إلى شبكة المنشأة والشبكة العامة. تُعد هذه النقطة عرضة لنبضات الجهد العالي الناتجة عن خطأ القصر في الشبكة أو صواعق خطوط النقل الهوائية. يحتوي العاكس **Huawei SUN2000-25KTL-M5** على منظومة حماية متكاملة مدمجة على مخرجه الكهربائي لحماية كروت الفلترة والتحويل من **النوع الثاني** (**Type 2 AC SPD**) العكسي.

للمحددات التالية AC تخضع الحماية في جانب الـ:

- **جهد التشغيل المستمر الأقصى ($U_{\text{c -AC}}$):** مصمم ليتحمل الارتفاعات الديناميكية لجهد الطور التشغيلي المتوفر في الموقع ($U_c \approx 400$ V بين الأطوار)، حيث تبلغ سعة صمود المانع المدمج 480 V AC (Line-to-Line)، مما يمنع تفكك المانع حرارياً عند حدوث تذبذبات الجهد الاعتيادية في الشبكة.
- **تيار التفريغ الاسمي (I_n):** يمتلك المانع المدمج القدرة على تصريف تيارات نبضية متكررة بشكل موجة قياسي ($8/20\mu$ s) بسعة لا تقل عن 20 kA لكل طور، وتصل سعة التفريغ القصوى ($I_{\max}$) إلى 40 kA، مما يضمن تشتيت استطاعة الصدمة الكهربائية بأمان دون تلف الحماية من المرة الأولى.

ثالثاً: التكامل الديناميكي والتنسيق الحمائي (Protection Coordination)

على تكنولوجيا المقاومات المتغيرة مع (Type 2) تعتمد آلية عمل مانعات الصواعق المدمجة من النوع الجهد (Metal Oxide Varistors - MOVs). في الحالة الطبيعية، تمتلك هذه العوازل مقاومة أومية فائقة تؤول إلى اللانهاية (∞)، مما يمنع تسريب أي تيار إلى الأرض. بمجرد حدوث جهد عابر يتجاوز عتبة التشغيل ميكروياً في زمن استجابة نانومتري ($t_a \leq 25$ ns)، لتتحول إلى مسار قصير MOVs الآمن، تنهار مقاومة الـ الجهد وتوجيه تيار الصدمة الفائض مباشرة إلى غلاف العاكس (Clamping) "المقاومة يقوم بـ "كبح المعدني ومنه إلى شبكة التأريض.

> بأنه في حال تجاوزت المسافة الفيزيائية الفاصلة بين مصفوفة **IEC 60364-7-712** يوصي كود الألواح على السطح وبين موقع تركيب العاكس مسافة 10 meters، فإنه يجب تركيب لوحة حماية (DC SPD Type 2) تحتوي على مانع صواعق (External DC Combiner Box) خارجية إضافية

مستقل عند أقرب نقطة لدخول كابلات السلاسل للمبنى. وبما أن تصميم المحطة الحالية يعتمد على تركيب العاكس في موقع قريب ومجاور للمصفوفة على السطح بمسافة تقل عن الحدود يُعد كافياً ومطابقاً Huawei الحرجة، فإن الاعتماد على الحمايات المدمجة فائقة الوثوقية من لأعلى معايير الأمان الأكاديمية والتطبيقية، مما يعزز الجدوى الاقتصادية للمشروع دون المساومة على السلامة.

رابعاً: تلخيص المواصفات الفنية لمنظومة الحماية من الجهود العابرة

يلخص الجدول التالي المحددات والمواصفات الهندسية لمانعات الصواعق المدمجة في المنظومة والـ DC والـ AC لجانبي الـ:

البند الفني	توصيف جانب التيار المستمر	توصيف جانب التيار المتردد	المرجعية والتحقق
فئة الحماية القياسية (SPD Type)	النوع الثاني (Type 2 / Class II)	النوع الثاني (Type 2 / Class II)	IEC 61643-11 / Huawei Datasheet
أقصى جهد تشغيل مستمر (U_c)	≥ 1100 V DC	480 V AC (L-L)	التحليل الحراري لنافذة جهد العاكس
جهد الحماية المتبقي (U_p)	≤ 3.5 kV	≤ 2.0 kV	حماية عازلة كروت الـ IGBT (U_w)
تيار التفريغ الاسمي ($I_n - \frac{8}{20}\mu$ s)	20 kA	20 kA	معيار الصدمات التحريضية غير المباشرة
أقصى تيار تفريغ ($I_{\max} - \frac{8}{20}\mu$ s)	40 kA	40 kA	التحمل الديناميكي للمقاومات الكيميائية
زمن الاستجابة الحركي (t_a)	≤ 25 ns	≤ 25 ns	حماية الدوائر المتكاملة الحساسة لسرعة النبضة
حالة الربط والتركيب (Status)	مدمج قياسياً (Built-in)	مدمج قياسياً (Built-in)	مطابقة معمارية العاكس الذكي المعتمد

Table 2: المواصفات والمحددات الفنية الهندسية لمانعات الصواعق المدمجة لجانبي التيار المستمر (DC) والتيار المتردد (AC) في المنظومة.

إن تفعيل عمل مانعات الصواعق المدمجة مشروط بشكل قطعي بربط نقطة تأريض هيكل العاكس الخارجية (Chassis Grounding) وهو ما سيتم, ($\leq 5\Omega$) بشبكة تأريض منخفضة المقاومة تفصيله وحسابه هندسياً في الفقرة اللاحقة الخاصة بتصميم شبكة التأريض والربط متساوي الكهروجهد.

تصميم شبكة التأريض والربط متساوي الكهروجهد (Earthing System & Equipotential Bonding)

تُمثل منظومة التأريض والربط متساوي الكهروجهد الركيزة الأمنية والتشغيلية الجوهرية في الجانبين المستمر والمتردد للمنظومة الكهروضوئية. ولا تقتصر فلسفتها على تصريف تيارات الأعطال المفاجئة فحسب، بل تمتد لتشمل حماية المعدات الرأسمالية الثمينة من الانهيار المبكر، وتوفير بيئة تلامس آمنة للأفراد الصيانة وفقاً للمواصفات العالمية الصارمة (الخاصة بمتطلبات التمديدات) **IEC 60364-7-712** لتصميم الأرضي العملي **IEEE 80** لإدارة مخاطر الصواعق، والكود **IEC 62305** والمعيار (الكهروضوئية.

أولاً: تأريض هياكل التثبيت المعدنية ومكافحة ظاهرة الـ PID

تتعرض هياكل التثبيت المعدنية للألواح (المصنوعة من الألومنيوم المؤكسد Anodized Aluminum أو الحديد المغلون على الساخن Hot-Dip Galvanized Steel) لتراكم مستمر للشحنات الساكنة (Static Charges) الناتجة عن حركة الرياح والاحتكاك بالجسيمات الجوية. يؤدي غياب المسار الأرضي لتفريغ هذه الشحنات إلى نشوء فرق جهد مستمر مرتفع جداً بين الخلايا السيليكونية الداخلية (DC High Potential) والإطار المعدني الخارجي المحيط باللوح النشطة.

1. **آلية نشوء ظاهرة التحلل المتسارع للعزل (Potential Induced Degradation - PID):**

   تحت تأثير هذا الحقل الكهربائي الحرج المستمر، تنشأ تيارات تسريب ميكروية تدفع أيونات الصوديوم الموجبة (Na^+) الموجودة في الزجاج الأمامي للوح نحو سطح الخلايا السيليكونية. تتسبب هذه الأيونات المهاجرة في تدمير البنية البلورية للوصلات الثنائية (P-N Junctions) وخفض عازلية الخلايا، مما يؤدي إلى هبوط حاد في كفاءة الألواح وتدني استطاعتها بمعدلات قد تتجاوز 30% خلال فترات تشغيلية قصيرة.

   من هذا الانهيار، يفرض التصميم ربطاً فيزيائياً **LR5-72HTH-600M** لحماية ألواح المنظومة من طراز ميكانيكياً متيناً ومستمراً لجميع الإطارات المعدنية للألواح وسكك التثبيت بشبكة التأريض الكلية. يضمن هذا الإجراء جعل جهد كافة الأجزاء المعدنية المحيطة مساوياً لجهد الأرض (صفر فولت مطلق)، مما يحيد الحقل الكهربائي المسبب لهجرة الأيونات.

   ويتكامل هذا التصميم الوقائي مع ميزة التعافي النشط المدمجة في العاكس المعتمد **Huawei SUN2000-25KTL-M5** (**Integrated PID Recovery**)، والتي تعتمد على خط التأريض كمرجع تشغيلي أساسي لتسليط جهد عكسي ليلاً لإعادة الأيونات المهاجرة وتجديد كفاءة العزل تلقائياً.

2. **التوصيف الفني ونواقل ربط الهياكل:**

   - **نوع الموصل:** يتم استخدام موصلات نحاسية مجدولة معزولة بـ PVC مقاوم للأشعة فوق البنفسجية طراز **Cu/PVC (أخضر/أصفر)** أو موصلات نحاسية عارية (**Bare Copper Conductors**).
   - **تحجيم المقطع العرضي (A_{bonding}):** وبما أن المحطة تحتوي، **IEC 60364-7-712** استناداً للمعيار على حماية خارجية من الصواعق، يجب ألا يقل المقطع العرضي لناقل الربط الرئيسي متساوي الجهد عن 16mm^2 من النحاس لضمان تحمل الإجهادات الحرارية والميكانيكية الناتجة عن التيارات النبضية العالية. أما بالنسبة للروابط البينية الموضعية بين السكك المتجاورة (Jumper Cables)، فيتم اعتماد 6mm^2 مقطع 10mm^2 أو.
   - **معالجة عازلية الألومنيوم:** نظراً لأن طبقة الأكسدة السطحية للألومنيوم المؤكسد تُعد عازلاً كهربائياً، يلزم التصميم استخدام كليبات تأريض وغسالات مسننة خاصة (**Serrated Grounding Washers / Clips**) مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ عند نقاط التثبيت، بحيث تخترق أسنانها الحادة طبقة الأكسدة ميكانيكياً عند إحكام الربط، لضمان استمرارية كهربائية كاملة (Electrical Continuity) بمقاومة تلامس تؤول إلى الصفر ($\leq 0.1\Omega$).

ثانياً: توصيف مسارات شبكة التأريض لإطار العاكس ولوحات التوزيع

تم، (Contact Voltages) لضمان سحب تيارات الأعطال وحماية الأفراد من مخاطر جهود التلامس الخطرة تصميم مسارات شبكة التأريض للمكونات الحيوية وفق نظام تأريض محمي هندسياً يعتمد على مبدأ التكرارية الأمنية (Redundant Earthing Path):

1. **تأريض جسم العاكس (Inverter Chassis Grounding):**

   العاملة بتقنية تعديل عرض (IGBT Bridges) تنتج الدوائر الإلكترونية عالية التردد وأشباه الموصلات (**Capacitive Leakage Currents**) داخل عاكس هواوي تيارات تسريب سعوية طفيلية (**PWM**) النبضة تتدفق نحو جسمه المعدني الخارجي. لتأمين تصريف هذه تيارات، يخضع العاكس لمساري تأريض مستقلين:

   - الرئيسي AC الخاص بكابل مخرج الـ PE **المسار الأول (الأرضي التشغيلي المدمج):** يتم توصيل طرف (بمقطع $16\mathrm{mm}^2$ نحاس) مباشرة بالمنفذ المخصص له داخل علبة التوصيل المحمية للعاكس.
   - يتم تأريض البرغي، **IEC 62109-1 المسار الثاني (الأرضي الوقائي للهيكل):** امتثالاً للمعيار الدولي بواسطة ناقل نحاسي (Chassis Earthing Terminal) الخارجي المثبت على الهيكل المعدني للعاكس (**Main Earthing Busbar - MEB**) مستقل معزول بمقطع $16\mathrm{mm}^2$، ويتوجه مباشرة إلى **لوحة التأريض الرئيسية**. يعتمد العاكس الذكي على هذا الخط كمرجع حاسم لإجراء فحص مقاومة العزل (**Isolation Resistance Monitoring**) للحقل الشمسي قبل الإقلاع اليومي؛ وفي حال رصد أي خلل أو ضعف في اتصال هذا المسار، يرفض العاكس ربط المنظومة بالشبكة ويطلق إنذار عطل أرضي (**Ground Fault**)، منعاً لظهور جهود تلامس قاتلة على غلافه.

2. **تأريض لوحات التوزيع (Distribution Boards Earthing):**

   ولوحة التوزيع (DC Combiner Box) يتم ربط الهياكل المعدنية وأبواب لوحة تجميع التيار المستمر المترددة الرئيسية (ACDB) بجسر تأريض داخلي نحاسي مستقل باستخدام كابلات نحاسية معزولة **Cu/PVC** بمقطع $16\mathrm{mm}^2$. تُجمع خطوط التأريض القادمة من أجهزة الحماية ضد الجهود العابرة (SPDs) وقواطع الدورة وتربط جميعها عبر نواقل رئيسية متوجهة إلى منظومة أقطاب الأرضي الكلية.

ثالثاً: شبكة أقطاب التأريض

لتحقيق الهدف الأكاديمي والتنظيمي الصارم الذي يفرض ألا تتجاوز المقاومة الكلية لشبكة التأريض **5 أوم** ($R_e < 5\Omega$) لضمان سرعة استجابة وسائط الفصل الآلي، تم اعتماد تصميم هندسي يتكون من قضبان فولاذية ملبسة بالنحاس (Copper-Bonded Steel Rods) مدفونة عمودياً في التربة المحيطة بالموقع الإنشائي.

1. **النمذجة الرياضية لمقاومة قضيب التأريض المفرد (Dwight's Formula):**

   تُحسب المقاومة الأومية لقضيب تأريض عمودي مفرد مغروس في تربة متجانسة بالاعتماد على معادلة "دوايت" الفيزيائية القياسية:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln\left(\frac{4L}{d}\right) - 1\right]$$

   حيث المحددات الهندسية المختارة للمشروع هي:

   - ρ: المقاومية النوعية للتربة بالموقع، وبفرض قيمة نموذجية لتربة طينية/مزيجية متوسطة الرطوبة قدرها $\rho = 100\Omega \cdot \mathrm{m}$.
   - L: الطول الفيزيائي الفعال لقضيب التأريض، وتم اعتماد قضبان قياسية بطول $L = 2.5\ \mathrm{m}$.
   - d: القطر الخارجي لقضيب التأريض، وتم اعتماد قطر هندسي قياسي $d = 16\ \mathrm{mm} = 0.016\ \mathrm{m}$.

تطبيق الحساب العددي للقطب المفرد:

نحسب أولاً النسبة الهندسية للأبعاد داخل اللوغاريتم:

$$\frac{4L}{d} = \frac{4 \times 2.5}{0.016} = 625$$

بإيجاد اللوغاريتم الطبيعي للناتج:

$$\ln(625) \approx 6.4378$$

بالتعويض المباشر في صيغة دوايت:

$$R_1 = \frac{100}{2 \times \pi \times 2.5} \times [6.4378 - 1]$$

$$R_1 = \frac{100}{15.708} \times 5.4378 \approx 6.366 \times 5.4378 \approx 34.61\Omega$$

2. **حساب عدد القضبان المطلوبة للتوصيل على التوازي ومقاومة الحقل الإجمالية:**

نظراً لأن مقاومة القطب الواحد (34.61Ω) تتجاوز الحد المسموح، يتم ربط عدة قضبان على التوازي بمسافات بينية متباعدة تساوي ضعف طول القضيب على الأقل ($S = 2L = 5\ \mathrm{m}$) لتفادي تداخل مخاريط الجهد (Voltage Cones) بالعلاقة (R_{total}) في التربة. تُحسب مقاومة الحقل الإجمالية:

$$R_{\text{total}} = \frac{R_1}{N} \times \eta$$

حيث:

- N: عدد القضبان المربوطة توازياً.
- η: معامل التداخل الرياضي بين الأقطاب (Combining Factor)، ويؤخذ للتوزيع الخطي المتباعد بقيمة هندسية $\eta = 1.15$.

لتأمين هامش أمان تشغيلي مريح، يستهدف التصميم الوصول إلى مقاومة كلية $R_{\text{total}} \leq 4\Omega$ (أقل من الحد الأكاديمي الأعلى 5 أوم):

$$4 = \frac{34.61}{N} \times 1.15 \Rightarrow N = \frac{34.61 \times 1.15}{4} \approx 9.95$$

يتم تقريب الناتج إلى الرقم الصحيح الأعلى؛ وبناءً عليه، تتكون شبكة التأريض من **10 قضبان تأريض عمودية**، تُغرس على مسافات بينية لا تقل عن $5\ \mathrm{m}$، ويتم تجميعها وربطها تحت مستوى الأرض (على عمق $0.8\ \mathrm{m}$ من السطح لمنع التأثر بالجفاف الحراري) بواسطة ناقل نحاسي عارٍ (**Bare Copper Cable**) بمقطع عرضي قدره $\mathbf{50mm^2}$، مما يضمن خفض المقاومة الفعالة الكلية الكهروضوئية للحقل إلى $\mathbf{3.98\Omega}$، وهو ما يحقق امتثالاً مطلقاً للمعايير الهندسية.

رابعاً: الجدول التلخيصي والمواصفات الفنية لمنظومة التأريض والربط متساوي الجهد

يلخص الجدول التالي كافة العناصر والمكونات التي تم حسابها وتوصيفها لشبكة تأريض المحطة:

الوظيفة الحمائية والتشغيلية المستهدفة	المرجعية والمعيار الدولي	التوصيف والمقطع العرضي المعتمد	البند الفني وعنصر الشبكة
تفريغ الشحنات الساكنة وتحييد الحقل الكهربائي لمكافحة الـ PID	IEC 60364-7-712	سلك نحاسي عارٍ أو بمقطع Cu/PVC $16mm^2$	**ناقل ربط إطارات الألواح والسكتين**
اختراق طبقة الأكسدة السطحية وضمان مقاومة تلامس $\leq 0.1\Omega$	معايير الاستمرارية الكهربائية	غسالات مسننة وكليبسات واختراق الفولاذ (Serrated Clips)	**وسائط تلامس الألومنيوم المؤكسد**

الوظيفة الحمائية والتشغيلية المستهدفة	المرجعية والمعيار الدولي	التوصيف والمقطع العرضي المعتمد	البند الفني وعنصر الشبكة
تصريف تيارات التسريب وتفعيل PWM السعوية نظام الـ Isolation Monitor	IEC 62109-1 / Huawei Datasheet	كابل نحاسي معزول بمقطع Cu/PVC $16mm^2$	**ناقل تأريض غلاف العاكس الخارجي**
تأمين مسار منخفض المقاومة لإجبار أجهزة الحماية على الفصل الفوري	كود التصميم للوحات الكهربائية	كابلات نحاسية Cu/PVC معزولة بمقطع $16mm^2$	**نواقل تأريض AC لوحات الـ DC والـ**
التصريف النهائي والآمن لتيارات القصر العالية وصدمات الصواعق للتربة	Dwight's Formula	قضبان فولاذية 10 ملبسة بالنحاس (طول 2.5 m / قطر 16 mm)	**قضبان حقل التأريض الرئيسي**
تجميع الأقطاب المتوازية وضمان توزيع متساوي للكهروجهد (Equipotential)	IEEE 80	كابل نحاسي عارٍ بمقطع $50mm^2$ 0.8 m مدفون عمق	**ناقل الربط الأفقي بين الأقطاب**

Table 3:

المخطط أحادي الخط (Single Line Diagram)

يُعد المخطط أحادي الخط (Single Line Diagram)، الوثيقة المرجعية الأولى لمهندسي التنفيذ والصيانة، حيث يلخص البنية الكهربائية وترابط المكونات للمنظومة؛ من نقطة التوليد الكهروضوئي وصولاً إلى نقطة الربط بشركة توزيع الكهرباء. ويتتبع التصميم التخطيطي المسارات الكهروضوئية كالآتي:

1. **جانب التيار المستمر (DC Side Configuration):**
   - **مصفوفة الألواح:** يتضح من المخطط توزيع الـ 39 لوحاً شمسياً (LR5-72HTH-600M من طراز) على 3 سلاسل كهربائية مستقلة (Strings)، بحيث تحتوي كل سلسلة على 13 لوحاً موصولة على التوالي.
   - **صندوق الحماية والتجميع (DC String Protection):** يتم تمديد الطاقة عبر كابلات طاقة شمسية نحاسية مرنة مقاومة للأشعة فوق البنفسجية بمقطع $1 \times 4\text{mm}^2$ باللونين الأحمر والموجب. تمر من الفئة التشغيلية gPV بسعة اسمية تبلغ (DC Fuses) كل سلسلة عبر مصاهر حماية تيار مستمر $25\ \text{A}$ وجهد اسمي $1000\ \text{V DC}$ لحماية الخلايا من تيارات القصر الراجعة.
   - **التوزيع على متعقبات القدرة (MPPT Mapping):** يُظهر المخطط ربط السلسلتين (String 1 & String 2) على التوازي قبل الدخول إلى المتعقب الأول ($\text{MPPT}\ 1$) للعاكس، في حين تدخل السلسلة (String 3) الثالثة بشكل منفصل ومستقل تماماً إلى المتعقب الثاني ($\text{MPPT}\ 2$) لحصر تأثير ظلال العوائق الإنشائية الشرقية.
   - **العزل والحماية من الصواعق:** يتضمن المخطط قواطع الفصل الميكانيكي المستمر (DC Isolators) المدمجة في العاكس لكل متعقب، تليها منظومة حماية مدمجة ضد خطوط الجهد العابر ناتجة الصواعق غير المباشرة عبر مانعات جهد من الصنف الثاني (Type 2 DC SPD).
2. **العاكس الشمسي الذكي (Smart Inverter Stage):**
   - قلب المنظومة، حيث يستقبل قدرة التيار المستمر (Huawei SUN2000-25KTL-M5) يُمثّل العاكس المتغيرة ويقوم بتحويلها ومعالجتها بذكاء إلى طاقة مترددة متزنة (Balanced 3″-Phase“ AC) عند $50\ \text{Hz}$ وتردد $400\ \text{V}$ جهد شبكة اسمي.
3. **جانب التيار المتردد والربط بالشبكة (AC Side Configuration):**
   - **كابل الطاقة الرئيسي:** يخرج التيار المتردد الأقصى للعاكس والبالغ تشغيلياً $38\ \text{A}$ عبر كابل نحاسي من إنتاج شركة السويدي للكابلات بمقطع PVC ومغلف بـ XLPE متعدد النوى معزول بمادة الـ مقنن يبلغ $4 \times 10\text{mm}^2$.
   - **لوحة الحماية المترددة (ACDB):** يتجه الكابل مباشرة إلى لوحة توزيع الحماية المترددة، حيث يربط رباعي الأقطاب ($4 - \text{Pole}$) بسعة مقننة تبلغ (MCB/MCCB) بقاطع حماية رئيسي حراري مغناطيسي $50\ \text{A}$ وسعة قطع صمود ضد التيارات اللحظية. كما تشتمل اللوحة على مانع الصواعق المتردد (Type 2 AC SPD) المدمج بالعاكس لتأمين الكروت الإلكترونية من تشوهات الشبكة والجهود العابرة.
4. **شبكة التأريض والربط متساوي الكهروجهد (Earthing Systems):**
   - يوضح المخطط خطوط التأريض الوقائي والتشغيلي، حيث ترتبط هياكل الألواح المعدنية (الألومنيوم) وإطار العاكس وجسم لوحة التوزيع عبر نواقل نحاسية مجدولة إلى بئر تأريض مشترك لضمان تفريغ الشحنات الساكنة وتحقيق مقاومة أرضية كلية منخفضة للغاية ($\leq 5\Omega$).

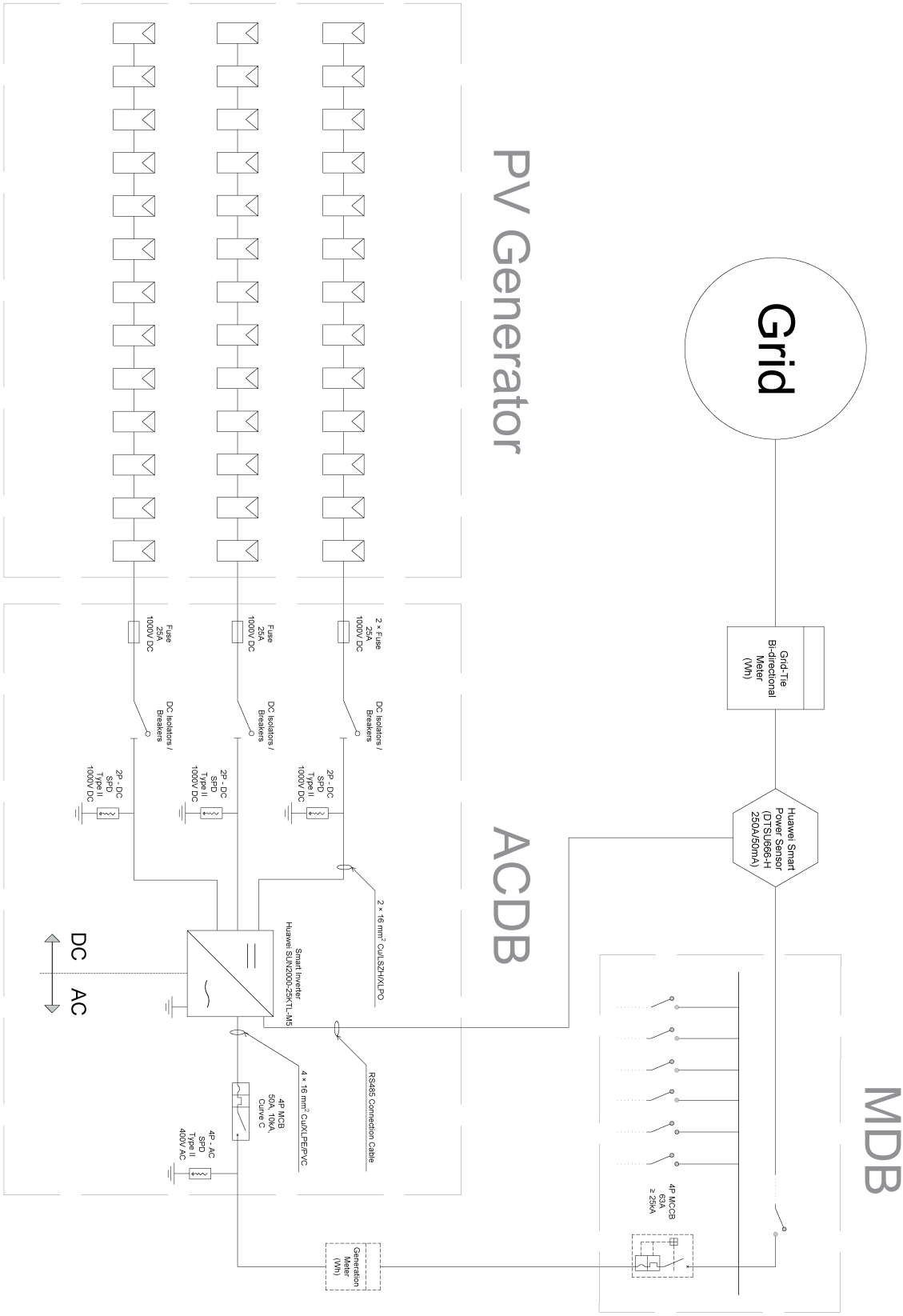

Figure 5: المخطط أحادي الخط التفصيلي للمنظومة الكهروضوئية الذي تم اعداده عبر برنامج AutoCAD، يوضح الربط الكهربائي وجوانب الحماية من التيار المستمر والمتردد

وثيقة أساسية في إدارة وتنفيذ المشروع، ويحدد الهوية (BOQ) يعتبر **جدول الكميات والمواصفات** التجارية والمواصفات التقنية القياسية لكل عنصر في المحطة. إذ يُلخص الجدول التالي كافة المكونات الكهربائية والميكانيكية المعتمدة في تصميم المنظومة الشمسية متضمنة التوصيف الفني الدقيق، الكميات، والجهات المصنعة الرائدة بما يطابق الدراسات الأكاديمية المنجزة:

البند	العنصر والمواصفات الفنية الهندسية التفصيلية	الشركة المصنعة المقترحة	الوحدة	الكمية
1	**الألواح الشمسية الكهروضوئية (PV Panels):** لوح شمسي كربوني ذو كفاءة عالية وتكنولوجيا من نوع **N-Type HPBC**. عند شروط **W**الاستطاعة الاسمية للوح: **600** الاختبار القياسية (STC). طراز اللوح: **LONGi LR5-72HTH-600M**. ذو إطار من الألمنيوم المؤكسد، ومقاومة عالية للأحمال الميكانيكية والظروف البيئية المتطرفة، وضمان أداء خطي لا يقل عن 25 عاماً.	LONGi Solar	عدد	**39**
2	**العاكس الذكي المرتبط بالشبكة (Grid-Tied Smart Inverter):** (**3-Phase AC**) عاكس ذكي ثلاثي الأطوار وجهد خرج **kW**باستطاعة اسمية فعالة تبلغ **25** **Huawei**: طراز. **Hz**وتردد **50 V**مقنن **400** **SUN2000-25KTL-M5**. مزود بتقنية متتبعات (**Multi-MPPT**) متعددة لنقطة الاستطاعة القصوى، نظام حماية متكامل مدمج ضد القوس الكهربائي (AFCI)، وكفاءة أوروبية لا تقل عن 98%.	Huawei Technologies	عدد	**1**
3	**مصاهر حماية السلاسل في جانب التيار المستمر (DC Fuses):** مصاهر أسطوانية متخصصة لحماية الأنظمة الكهروضوئية من الفئة الفنية **gPV** لحماية السلاسل في الأقطاب الموجبة والسالبة ضد التيارات العكسية. السعة الاسمية (I_n): **25 A**، وسعة قطع **V DC**، والجهد المقنن: **1000** **kA**. لحظية لا تقل عن **30** توردكاملة مع حوامل المصاهر المعزولة الخاصة بها للقضبان الداعمة (DIN Rail).	Schneider / ABB / Bussmann	عدد	**6**
4	**قواطع عزل جانب التيار المستمر (DC MCB):** قواطع مغناطيسية حرارية مصممة للتيار	Schneider / ABB	عدد	**3**

الكمية	الوحدة	الشركة المصنعة المقترحة	العنصر والمواصفات الفنية الهندسية التفصيلية	البند
			المستمر ثنائية الأقطاب (2 — Pole)، تستخدم لتأمين حماية إضافية ونقطة عزل ميكانيكية مستقلة لكل سلسلة قبل الدخول للعاكس. السعة الاسمية: 32 A، والجهد التشغيلي المقنن: 1000 V DC.	
3	عدد	Schneider / Phoenix Contact	**مانعات الصواعق والجهود العابرة لجانب المستمر (DC SPD):** جهاز حماية من الارتفاع المفاجئ في الجهد والجهود العابرة الناتجة عن الصواعق من النوع مخصص للتيار المستمر. جهد العمل (Type II) ومزود بمؤشر بصري، 1000 V DC الآمن المقنن: يوضح كفاءة عمل كبسولات الحماية القابلة للاستبدال.	5
1	عدد	Schneider / Hensel	**لوحة تجميع وحماية جانب التيار المستمر (DC Combiner Box):** لوحة تجميع خارجية فارغة مصنوعة من مادة البولي كربونيت المقاومة للصدمات وللأشعة (UV-Stabilized Polycarbonate, Class II) فوق البنفسجية ذات درجة حماية. IP66 عالمية لا تقل عن لتتحمل التموضع DIN Rail الخارجي على السطح، مجهزة بـ ومرابط كابلات وغدد غلق محكمة الإغلاق لكابلات الدخل والخرج.	6
300 *(تقديري)*	متر طولي	KBE / Prysmian / السويدي	**كابلات طاقة شمسية متخصصة لجانب المستمر (DC Solar Cables):** كابلات طاقة شمسية مطابقة للمواصفة الأوروبية EN 50618. الموصل من النحاس المرن متعدد النوى المكسو بالقصدير (Tinned Copper) لمقاومة الأكسدة والرطوبة. عزل مزدوج من مادة البولي أوليفين المتشابك الخالي من الهالوجين ومنخفض انبعاث الدخان (XLPO/LSZH)، مقاوم للأشعة فوق البنفسجية. المقطع المقنن: 4 mm² باللونين الأحمر والأسود لتمييز الأقطاب.	7
12 *(تقديري)*	زوج	Stäubli (MC4 Original)	**موصلات السلاسل الشجرية (MC4 Connectors):** أزواج من وصلات الذكر والأنثى من طراز MC4	8

الكمية	الوحدة	الشركة المصنعة المقترحة	العنصر والمواصفات الفنية الهندسية التفصيلية	البند
			ومقاومة **IP68**، القياسي، ذات درجة حماية للأشعة فوق البنفسجية ومصممة لتحمل V DC، وجهود تصل لـ 1000 A تيارات حتى 40 تستخدم لربط نهايات السلاسل باللوحة.	
1	عدد	Schneider / ABB	**(Main AC Circuit Breaker): قاطع جانب التيار المتردد الرئيسي** (**4-Pole: 3P+N**)، قاطع تيار حراري مغناطيسي رباعي الأقطاب يستخدم كحماية وعزل رئيسي لخرج العاكس المتردد. السعة الاسمية المقننة: **50A**. سعة قطع الأعطال (I_{cu}) لا تقل عن **25kA** عند جهد 400 V AC لضمان إخماد القوس الكهربائي بأمان والربط مع باسبارات الشبكة.	9
1	عدد	Schneider / Phoenix Contact	**(AC SPD): مانع الصواعق والجهود العابرة لجانب المتردد** جهاز حماية من الارتفاع المفاجئ في الجهد من (**4-Pole**) رباعي الأقطاب (**Type II**) النوع مخصص لأنظمة التيار المتردد ثلاثية الأطوار، (400V) متوافق مع جهد الشبكة في الموقع لحماية العاكس من النبضات القادمة من (AC) جهة الشبكة.	10
1	عدد	Schneider / ABB	**(ACDB Enclosure): لوحة توزيع وحماية جانب التيار المتردد** لوحة جدارية معدنية أو بلاستيكية صلبة ذات درجة حماية **IP65** للاستخدام الداخلي/المحمي، مجهزة بمؤشرات إضاءة نيون (**3-Phase Neon Indicators**)، للأطوار الثلاثة (Digital Multifunction Meter) وجهاز قياس رقمي متعدد الوظائف لقراءة الجهد والتيار والتردد.	11
50 *(تقديري)*	متر طولي	شركة السويدي للكابلات	**(Main AC Cable): كابل الطاقة المتردد الرئيسي** كابل طاقة نحاسي متعدد النوى مجدول راتب معزول بمادة البولي إيثيلين المشابك (**Cu**) **PVC** ومغلف بطبقة خارجية من الـ (**XLPE**) **IEC 60502-1**. مطابق للمواصفة الدولية المقطع الهندسي المقنن المعتمد: $4 \times 10\text{mm}^2$ A لنقل تيار الخرج البالغ تشغيلياً 38 وضمان هبوط جهد مثالي يبلغ 0.717% (أقل من حد 1%).	12

الكمية	الوحدة	الشركة المصنعة المقترحة	العنصر والمواصفات الفنية الهندسية التفصيلية	البند
1	مجموعة متكاملة	مواصفات هندسية قياسية	**هياكل التثبيت الميكانيكية (Mounting Structures):** هياكل تثبيت هندسية مصممة خصيصاً للتوزيع والنمط المتدرج (**Terraced / Stepped Structures**) للاستغلال الأعظمي للمساحة المتاحة ($129m^2$). مجاري التثبيت (Rails) مصنوعة من الألمنيوم المؤكسد عالي الصلابة والقواعد والأرجل (**Anodized Aluminum**)، الداعمة من الحديد المجلفن على الساخن (**Hot-Dip Galvanized Steel**). مصممة لزاوية ميل ثابتة $31°$ وتوجيه جنوبي كامل ($0°$ Azimuth) ومقاومة للرياح العالية. تشمل كافة مثبتات الألواح البينية والطرفية والبراغي المصنوعة بالكامل من الفولاذ المقاوم للصدأ (**Stainless Steel A2/A4-70**).	13
1	مجموعة متكاملة	مواصفات قياسية عالمية	**منظومة التأريض والربط متساوي الجهد (Earthing System):** شبكة تأريض متكاملة تشتمل على نواقل نحاسية عارية لتأريض شاسيهات الألواح، كابلات نحاسية معزولة باللون الأخضر/الأصفر مقطع $16mm^2$ لتأريض العاكس واللوحات الكهربائية. (**Solid Copper Earth Rod**) تتضمن قضيب تأريض نحاسي نقي بطول **2 m**، وغرفة تفتيش واختبار حقلية ومواد كيميائية لتحسين التربة لضمان تحقيق مقاومة كلية مستهدفة $\leq 4\Omega$ امتثالاً للحسابات الرياضية.	14
1	مجموعة متكاملة	مواصفات قياسية	**منظومة مجاري وحماية الكابلات (Cable Management System):** مجاري كابلات معدنية مخرمة ومجلفنة على الساخن (**Perforated Hot-Dip Galvanized Cable Trays**) مع أغطيتها لحماية الكابلات الممددة على السطح من أشعة الشمس المباشرة، بالإضافة إلى أنابيب صلبة ومرنة مقاومة للأشعة فوق البنفسجية وأحزمة ربط معدنية متينة لربط كابلات السلاسل بالهياكل.	15

كميات الكابلات الواردة في الجدول هي كميات تقديرية وهندسية أولية، وتخضع للمراجعة الدقيقة والنهائية بناءً على مسارات التمديد الميدانية الفعلية وطبيعة السطح الإنشائية في الموقع.