

1. Избор фотонапонских панела и инвертора

Пројектни задатак

- Соларни (фотонапонски, скр. ФН) модули: 228 фотонапонских поликристалних модула снаге 240 W_p.
- На сваки од инвертора снаге 30 kW_p (укупно 2 комада) се прикључује по 6 стрингова (на сваки од 3 независна DC улаза по 2 стринга у паралели) који имају по 19 серијски повезаних модула.

Технички прорачуни

На слици 6.1 и 6.2 дати су каталошки подаци о фотонапонским модулима и инверторима који ће се користити у даљим разматрањима.

Key electrical data	Module output categories					
Performance data (except NOCT) under Standard Test Conditions (STC) ¹⁾	MPE 220 PS 09	MPE 225 PS 09	MPE 230 PS 09	MPE 235 PS 09	MPE 240 PS 09	MPE 245 PS 09
Rated output (P _{mpp})	220 W _p	225 W _p	230 W _p	235 W _p	240 W _p	245 W _p
Output tolerance (Δ P _{mpp})	+5%/-0%	+5%/-0%	+5%/-0%	+5%/-0%	+5%/-0%	+5%/-0%
Minimum output (P _{mpp min})	220 W _p	225 W _p	230 W _p	235 W _p	240 W _p	245 W _p
Rated voltage (U _{mpp})	28.77 V	29.03 V	29.29 V	29.54 V	29.80 V	30.06 V
Rated current (I _{mpp})	7.66 A	7.76 A	7.86 A	7.96 A	8.06 A	8.16 A
Open-circuit voltage (U _{oc})	36.34 V	36.68 V	37.01 V	37.34 V	37.67 V	38.00 V
Short circuit current (I _{sc})	8.28 A	8.33 A	8.37 A	8.42 A	8.47 A	8.52 A
Cell efficiency	15.4 %	15.7 %	16.1 %	16.4 %	16.9 %	17.2 %
Module efficiency	13.7 %	14 %	14.3 %	14.6 %	14.9 %	15.2 %
Temperature coefficient α (P _{mpp})	-0.47 %/°C	-0.47 %/°C	-0.47 %/°C	-0.47 %/°C	-0.47 %/°C	-0.47 %/°C
Temperature coefficient β (I _{sc})	+0.052 %/°C	+0.052 %/°C	+0.052 %/°C	+0.052 %/°C	+0.052 %/°C	+0.052 %/°C
Temperature coefficient γ (U _{oc})	-0.34 %/°C	-0.34 %/°C	-0.34 %/°C	-0.34 %/°C	-0.34 %/°C	-0.34 %/°C
Temperature coefficient δ (I _{mpp})	+0.052 %/°C	+0.052 %/°C	+0.052 %/°C	+0.052 %/°C	+0.052 %/°C	+0.052 %/°C
Temperature coefficient ε (U _{mpp})	-0.46 %/°C	-0.46 %/°C	-0.46 %/°C	-0.46 %/°C	-0.46 %/°C	-0.46 %/°C
Normal Operating Cell Temperature (NOCT) ²⁾	43°C (± 2 °C)	43°C (± 2 °C)	43°C (± 2 °C)	43°C (± 2 °C)	43°C (± 2 °C)	43°C (± 2 °C)
Max. permissible system voltage	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V
Number of cells	60 (6 x 10)	60 (6 x 10)	60 (6 x 10)	60 (6 x 10)	60 (6 x 10)	60 (6 x 10)
Cell size	156 x 156 mm	156 x 156 mm	156 x 156 mm	156 x 156 mm	156 x 156 mm	156 x 156 mm

¹⁾ Intensity of solar radiation 1000 W/m², air mass 1.5, cell temperature 25 °C, PV modules show electrical performance degradation over time. This occurs after commissioning, initially on a decreasing scale, then later in a linear progression.

²⁾ Intensity of solar radiation 800 W/m², ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

All key electrical data, with the exception of the rated output, is subject to a tolerance of +/-5 %. Key electrical data is typical values based on the measurement data from a produced module. No guarantee of the accuracy of the data is to be assumed for future production batches.

Слика 6.1 Извод из каталога соларних панела

Schüco Zentralwechselrichter der SGI 30k-02 Serie																					
Typ (Art. Nr.)	DC-Eingang							AC-Ausgang						Allgemeine Daten							
	Max. PV-Leistung [kW _p]	MPP-Bereich ¹⁾ [V _{oc}]	Max. DC-Spannung [V _{oc}]	Max. DC-Strom [A]	Anzahl MPP-Tracker	Anzahl DC-Anschlüsse	Max. Anschlussquerschnitt [mm ²]	AC-Nennleistung [kVA]	AC-Netzspannung ²⁾ [V] (3, N, PE)	AC-Nennstrom ³⁾ [A]	Max. AC-Strom ³⁾ [A]	Max. Anschlussquerschnitt [mm ²]	Leistungsfaktor (cos φ), einstellbar ⁴⁾	Frequenzbereich ⁵⁾ [Hz]	IP Schutzart ⁶⁾	Umgebungstemperatur ⁶⁾ [°C]	Geräuschemission ⁶⁾ [dB (A)]	Max. Wirkungsgrad [%]	Europ. Wirkungsgrad [%]	Maße B × H × T [mm]	Gewicht [kg]
SGI 25k-02 Home (272 125)	30,0	350 - 800	1000	3 × 34,0	3	3 × 4	10	25	230/400	36,2	36,2	50	-0,8 bis +0,8	45,0 - 55,0	54	-20 ... +60	58	98,0	97,8	840 × 1360 × 355	151
SGI 30k-02 Home (272 127)	37,5	350 - 800	1000	3 × 34,0	3	3 × 4	10	30	230/400	43,5	43,5	50	-0,8 bis +0,8	45,0 - 55,0	54	-20 ... +60	58	98,0	97,8	840 × 1360 × 355	151
SGI 33k-02 Home (272 129)	39,0	350 - 800	1000	3 × 34,0	3	3 × 4	10	33	230/400	48,3	48,3	50	-0,8 bis +0,8	45,0 - 55,0	54	-20 ... +60	58	98,0	97,8	840 × 1360 × 355	151

¹⁾ Bei Spannungen < 350 V reduziert sich die mögliche Ausgangsleistung
²⁾ 3-phasiger AC-Anschluss und 3-phasige symmetrische Einspeisung
³⁾ AC-Strom pro Phase
⁴⁾ Netzparametereinstellungen nach länderspezifischen Normen und Richtlinien. 3-phasige Überwachung nach DIN VDE 0126-1-1+E A1: 2011, VDEW-konform
⁵⁾ Der Wechselrichter darf nicht in einer ätzenden (z.B. Ammoniak) sowie entzündbaren Umgebung installiert und betrieben werden. Zudem sollte der Wechselrichter nicht der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt werden
⁶⁾ Bedingt durch Lüfterbetrieb

Слика 6.2 Извод из каталога соларних инвертора

Електрични параметри ФН модула од 240 Wp (слика 6.1) су:

Струја кратког споја:	$I_{SC} = 8,47 \text{ A}$
Напон отвореног кола:	$U_{OC} = 37,67 \text{ V}$
Номинална снага:	$P_{MPP} = 240 \text{ W}$
Максимални напон:	$U_{MPP} = 29,8 \text{ V}$
Максимална струја:	$I_{MPP} = 8,06 \text{ A}$

Усвајају се следеће вредности амбијенталних услова (на основу података о климатским условима на предвиђеној локацији за инсталацију система), као улазни параметри за прорачун. Односно, опсег у коме се очекује да ће ФН систем моћи да оствари пренос у мрежу максималне енергије коју могу да дају ФН модули у зависности од следећих критичних амбијенталних климатских услова:

Минимална температура амбијента:	$\theta_{a \min} = -25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Максимална температура амбијента:	$\theta_{a \max} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Максимална ирадијанса:	$G_{eff \max} = 1200 \text{ W/m}^2$
Минимална ирадијанса:	$G_{eff \min} = 200 \text{ W/m}^2$

- **Провера „МРР“ прозора инвертора**

На основу формуле (4.21) за пораст температуре pn споја,

$$\theta_{pn} = \theta_A + \frac{NOCT(^{\circ}C) - 20}{800 \text{ W/m}^2} G_{eff},$$

следи:

- за минималну температуру амбијента и минималну ирадијансу температура pn споја износи:

$$\theta_{pn \min} = -25 + \frac{43 - 20}{800} \cdot 200 = -19.25 \text{ }^{\circ}C,$$

- за максималну температуру амбијента и максималну ирадијансу:

$$\theta_{pn \max} = 40 + \frac{43 - 20}{800} \cdot 1200 = 74.5 \text{ }^{\circ}C$$

Из формуле (6.2),

$$V_{mp} = V_{mp}^* (1 + (T_C - T_C^*) \cdot \varepsilon), \quad \varepsilon = \frac{dU_{mp}}{dT_C},$$

следи:

- за максималну температуру амбијента се добија минимална вредност напона који је потребно довести на прикључак стрингова панела на улаз соларног инвертора:

$$V_{mp \min} = 29.8 \cdot \left(1 + (74.5 - 25) \cdot \left(-\frac{0.46}{100} \right) \right) = 23.01 \text{ V},$$

- за минималну температуру амбијента добија се максимални напон који треба довести на место прикључка стрингова на соларни инвертор:

$$V_{mp \max} = 29.8 \cdot \left(1 + (-19.25 - 25) \cdot \left(-\frac{0.46}{100} \right) \right) = 35.87 \text{ V}.$$

Опсег напона на DC улазу при коме инвертор може да инјектира енергију у наизменичну мрежу 3x400V, 50Hz, износи 350 V до 800 V, тако да су задовољени услови

$$V_{mp \text{ string } \min} = 19 \cdot 23.01 = 437.19 \text{ V} > 350 \text{ V},$$

$$V_{mp \text{ string } \max} = 19 \cdot 35.87 = 681.53 \text{ V} < 800 \text{ V},$$

односно могуће је остварити потребан напон на стринговима панела при коме се постиже МРР при било ком од постављених амбијенталних услова.

Закључак:

Врши се МРР праћење и регулација у опсегу ирадијације 200÷1200 W/m² и опсегу температуре амбијента -25÷40 °C.

Напомена:

Пад напона на кабловском воду који повезује стринг панела са соларним инвертором (Δu_{dc}) није уважен приликом овог прорачуна. Његова вредност ће бити касније израчуната. С обзиром на опсег реалних вредности пада напона и маргине у односу на дозвољени опсег [350V, 800V], извесно је да је остварен (испуњен) потребни опсег напона на стринговима панела унутар "МРР прозора" инвертора.

- **Провера максималног напона на улазу у инвертор**

На основу формуле (6.3) за напон отвореног кола,

$$U_{oc} = U_{oc}^* (1 + x \cdot (T_c - T_c^*)), \quad x = \frac{dU_{oc}}{dT_c},$$

узимајући у обзир најкритичнији случај са становишта температуре, следи да је:

$$V_{DC \max} = 19 \cdot U_{oc} = 19 \cdot 37.67 \cdot \left(1 + (-19.25 - 25) \cdot \left(-\frac{0.34}{100} \right) \right) = 823.41 \text{ V} < 1000 \text{ V DC},$$

на основу чега се закључује да је услов максималног напона на улазу инвертора испуњен.

Може се приметити да за ове услове, вредност заграде износи 1.15, што као оправдан потврђује приближан практични приступ да се заштитна опрема димензионише за напон који је 20% већи напон од напона при STC.

- **Провера улазне струје у инвертор**

На основу израза за температурну зависност струје кратког споја,

$$I_{sc} = I_{sc}^* (1 + \beta (T_c - T_c^*)), \quad \beta = \frac{dI_{sc}}{dT_c},$$

за 2 стринга на сваком од улаза инвертора, и за најкритичнији случај са становишта температуре, следи

$$I_{DC \max} = 2 \cdot I_{sc} = 2 \cdot 8.47 \cdot \left(1 + (74.5 - 25) \cdot \left(\frac{0.052}{100} \right) \right) = 17.38 \text{ A} < 34 \text{ A DC}.$$

Закључује се да је испуњен критеријум максималне струје на DC улазу инвертора.

- **Провера услова максималне снаге на улазу у инвертор**

На основу формуле (6.1) следи:

$$P_{mp} = \frac{P_{mp}^* \cdot G_{eff}}{1000} (1 + (T_c - T_c^*) \cdot \alpha), \quad \alpha = \frac{dP_{mp}}{dT_c},$$

Теоретски, највећа снага се јавља при максималној ирадијанси и минималној вредности температуре амбијента (за поликристалне модуле), али такав случај је готово немогућ у

практи. Висока ирадијанса и ниска температура амбијента су могуће у зимским условима, при сунчаним данима и присуству снега, када постоји висок степен рефлексије.

Теоретски за максималну ирадијансу и минималну вредност температуре амбијента има се:

$$\theta_c = \theta_A + \frac{NOCT(^{\circ}C) - 20}{800 \text{ W/m}^2} G_{eff}$$

$$\theta_{pn} = -25 + \frac{43 - 20}{800} \cdot 1200 = 9.5 \text{ }^{\circ}C ,$$

одакле се добија,

$$P_{mp \max} = 240 \cdot \frac{1200}{1000} \cdot \left(1 + (9.5 - 25) \cdot \left(-\frac{0.47}{100} \right) \right) = 308.98 \text{ W}$$

На основу реалних података за локацију превиђену за инсталацију овог система, појава максималне вредности ирадијансе од 1200 W/m^2 је карактеристична у летњим месецима где је температура амбијента преко $25 \text{ }^{\circ}C$. На основу ових података следи,

$$\theta_{pn} = 25 + \frac{43 - 20}{800} \cdot 1200 = 59.5 \text{ }^{\circ}C ,$$

одакле се добија

$$P_{mp \max} = 240 \cdot \frac{1200}{1000} \cdot \left(1 + (59.5 - 25) \cdot \left(-\frac{0.47}{100} \right) \right) = 241.30 \text{ W},$$

при чему је

$$V_{mp \max} = 29.8 \cdot \left(1 + (59.5 - 25) \cdot \left(-\frac{0.46}{100} \right) \right) = 25.07 \text{ V}$$

$$V_{mp \text{ string } \max} = 19 \cdot 25.07 = 476.34 \text{ V}$$

Ови подаци ће касније бити од значаја при прорачуну падова напона у DC колу.

Услед постојања 2 стринга на сваком од улаза инвертора, следи

$$P_{DC \max} = 2 \cdot P_{dc \text{ string } \max} = 2 \cdot 19 \cdot 241.3 = 9169.4 \text{ W} < \frac{30000}{3} \text{ W};$$

дакле при ирадијанси 1200 W/m^2 и температури амбијента преко $25^{\circ}C$, снага на улазу у инвертор (тј. у независне MPP улазе), ће бити мања од дозвољене.

Напомена:

Занемарени су губици у DC кабловима између фотонапонских модула и инвертора.

У случају појаве високих ирадијанси и ниских температура амбијента, може се догодити да снага у MPP независне улазе постане већа од 10kW . У тој ситуацији нема опасности за претварач, јер ће он променом напона на улазу у инвертор, снагу држати на вредности од 10kW ; јасно је да у таквим евентуалним периодима, који су кратког трајања, неће у потпуности моћи да се искористи енергија коју би могли да дају стрингови соларних панела.

Поред ограничења снаге на сваком од 3 DC улаза у инвертор, постоји и ограничење снаге на наизменичној страни (енергија која се испоручује мрежи) - каталошки податак;

$$P_{DC\ max} = 3 \times 10\text{kW} = 30\text{kW}, P_{AC\ max} = 25\text{kW}.$$

Пример:

Колика је минимална температура амбијента при којој се користи целокупна расположива снага из фотонапонских панела при максималној ирадијацији? Као критичнији, користити критеријум максималне снаге која се може имати на AC страни.

$$P_{DC\ max} = \frac{P_{AC\ max}}{\eta \cdot 3} = \frac{25000}{0.978 \cdot 3} = 8520.8\ W$$

$$P_{mp\ max} = \frac{P_{AC\ max}}{2 \cdot 19} = 224.23\ W$$

$$\theta_{pn} = \left(\frac{224.23}{240} \cdot \frac{1000}{1200} - 1 \right) \cdot \left(-\frac{100}{0.47} \right) + 25 = 72.11\ ^\circ\text{C}$$

$$\theta_a = 72.11 - \frac{43 - 20}{800} \cdot 1200 = 37.61\ ^\circ\text{C}$$

2. Избор заштитних компоненти и каблова

2.1. Максимални напон на DC страни

Инвертор поседује интегрисане прекидаче и осигураче који су декларисани за максималну улазну DC струју од 34 А. Заштита DC водова се поставља и на + и - пол, осим у специјалним случајевима када је уземљен минус пол; када се осигурава само плус пол.

Номинални напон заштитних компоненти (одводници пренапона, осигурачи) и проводника (каблова) U_n , мора бити већи од максималног напона који се јавља у DC колу ($U_{dc\ max}$) је дата раније у формули (6.3), или као:

$$U_n \geq U_{OC\ string} \cdot [1 + (\Delta\theta \times k_{temp})] \quad (1)$$

С обзиром на температурне услове, најчешће се претходна једначина своди на

$$U_n \geq U_{OC\ string} \cdot 1.2 \quad (2)$$

Провера максималног напона је идентична провери максималног напона на улазу у инвертор, приказаној у претходном делу текста; номинална вредност напона за прекидаче и осигураче је 1000V.

2.2. Максималне очекиване струје у DC водовима и прекострујна заштита

Специфичност ФН система је да кратак спој (довођење нултог напона на стрингове соларних панела) може настати као нормално радно стање. Специфично је и то што струја кратко спојених соларних панела није велика, односно није много већа од радне струје у тачки максималне снаге (оријентационо, струја кратког споја се повећа до 20 % у односу на радну тачку у MPP режиму). Дакле, одабир заштите, а затим и одабир пресека каблова, врши се према процењеној струји кратког споја, односно њеној највећој вредности која може да настане при претпостављеним амбијенталним условима. У Анексу ББ важећег ИЕС 60269-6 стандарда, препоручује се да се при одређивању струјне заштите уваже следећи услови и фактори:

- повећање ирадијације у односу на STC (нпр. на 1200 W/m²),
- повећање амбијенталне температуре до 45°C,
- старење опреме, и
- услови монтаже опреме и отежано хлађење.

Препорука у стандарду је да се вредност струјне заштите подеси на вредност која је 40% већа од струје кратког споја стринга или низа који се штите, при STC:

$$I_{n\ string\ osig} \geq 1.4 \cdot I_{SC\ STC\ string} \quad (3)$$

Дакле, осигурач је одабран тако да неће реаговати као последица било каквог радног стања у колу фотонапонских панела. Његова улога је да реагује на велике струје које би преко претварача текле од мреже ка месту кратког споја на једносмерној страни претварача.

2.3. Заштита од појаве инверзних струја

Не постоји опасност од појаве инверзне струје када постоји само један стринг. У случају када постоје два стринга са истим бројем фотонапонских модула и повезана су паралелно, инверзна струја ће бити увек нижа од вредности максималне дозвољене инверзне струје.

Дакле, када је фотонапонски систем састављен од једног или два стринга, наравно мисли се на оне са заједничким улазом у инвертор или у једносмерни подразвод, у том случају нема потребе за заштитом од инверзних струја.

Највећа дозвољена вредност инверзне струје (I_{RM} – *maximum reverse current*) по стандарду IEC 61730-2 за фотонапонске модуле износи $2\div 3 \cdot I_{sc}$ (струје кратког споја). Вредност инверзне струје зависи од броја паралелних стрингова на улазу у подразвод једносмерне струје или у инвертор.

Произвођачи фотонапонских панела често дају податак о максималној дозвољеној инверзној струји; опционо, даје се вредност струје максимално дозвољеног заштитног осигурача који штити модул или серијски повезане модуле истог типа.

Заштитна компонента од појаве превелике инверзне струје се користи уколико је укупан број стрингова већи или једнак 3, а чије су струје довољно велике да могу изазвати појаву инверзних струја у оштећеном стрингу.

Произвођачи као гарантовану вредност подносиве инверзне струје дају вредност која је проверена по тесту из стандарда IEC 61730-2: фотонапонски панел се тестира 2 сата при струји $1.35 I_{RM}$, при чему не сме бити појаве оштећења.

Максимална вредност инверзне струје која се може наћи у стрингу је дата следећом једначином:

$$1.35 I_{RM} < (N_S - 1) \cdot I_{SC \text{ MAX}} \quad (4)$$

где је: I_{RM} – максимална вредност инверзне струје фотонапонске ћелије дефинисана по стандарду IEC 61730,

N_S – укупан број стрингова ≥ 3 , и

$I_{SC \text{ MAX}}$ – максимална вредност струје кратког споја фотонапонског стринга.

Важно је напоменути да је вредност I_{RM} често недоступна од стране произвођача панела, и може се добити на посебан захтев. Тада је од користи информација о максимално дозвољеној струји заштитне компоненте.

Уколико су позната оба претходно наведена податка, приликом одабира заштите од инверзних струја узима се критичнија вредност.

2.4. Избор заштитне компоненте на DC страни

За прекострујну заштиту (од преоптерећења и од појаве инверзних струја) у фотонапонским системима користе се топливи осигурачи типа gPV (по стандарду IEC 60269-6).

По стандарду IEC 61730-2 код избора струјног нивоа топливога осигурача мора бити испуњен следећи услов:

$$1,4 \cdot I_{sc} \leq I_n \leq 2,4 \cdot I_{sc} \quad (5)$$

где је I_{sc} струја кратког споја фотонапонског модула, а I_n називна струја осигурача.

Доња граница је на основу разматрања из дела 2.2., а горња према услову максималне инверзне струје.

За одређивање горње границе је меродавна једначина (4), односно (опционо) податак о максималној вредности осигурача коју прописује сам произвођач и који се може наћи као каталошки податак о фотонапонском панелу.

У једначини (5) горња граница је добијена на основу дозвољене вредности од 90% максималне инверзне струје кроз фотонапонски модул, која износи $2.4 \cdot I_{sc}$.

Прорачун:

На основу једначине (3) следи:

$$I_{n \text{ string osig}} \geq 1.4 \cdot 8.47 = 11.86 \text{ A}$$

Ово је доња граница за избор осигурача по стандарду IEC 61730-2.

Пошто у каталогу соларног панела није дат податак о максимално дозвољеној инверзној струји кроз фотонапонски модул (а такође не постоји ризик од појаве опасних вредности инверзних струја јер постоји само два стринга по једном улазу у инвертор) тако да горњи лимит за одабир осигурача представља каталошки податак о максималној вредности струје заштитне компоненте панела (стринга) која износи 15A.

$$11.86 \leq I_n \leq 15$$

По стандарду IEC 61730-2 у случајевима када је само позната максимална вредност заштитног осигурача серијски повезаних модула, вредност максималне инверзне струје се може израчунати као:

$$I_{RM} = 1.35 \cdot I_{max \text{ string osig}} \quad (6)$$

где је са $I_{max \text{ string osig}}$ означена вредност максималне вредности заштитног осигурача, што је податак из каталога произвођача.

Закључак:

Усваја се типски цилиндрични осигурач са топљивим уметком за 12 A (1000 VDC). Усваја се двополни осигурач (осигурачки растављач, подножје за топљиви уметак; за прекидање и плус и минус пола ФН модула) за монтажу на DIN шину. Поменути осигурачки растављачи се монтирају на сваком од стрингова.

У случају употребе осигурача, препоручена је употреба и DC растављача снаге, у случају потреба за прекидањем DC кола (нпр. периодична мерења и интервенције).

2.4.1. Додатне корисне информације за одабир заштитне опреме

Приликом избора прекострујне заштите у великим фотонапонским системима (1 MWp и више), где се употребљава централни инвертор, потребно је обратити пажњу на више аспеката. Инверзне струје су у тим случајевима врло велике, па заштитни елементи морају имати одговарајуће нивое селективности како би се у случају квара елиминисао само део у квару, при чему се мора обезбедити и ефикасно деловање заштите. У оваквим системима се поред осигурача типа СН, конструисаним за мање вредности струја, користе и осигурачи типа NH, при чему је потребно ускладити селективност између осигурача типа СН и NH.

Честа и опасна грешка која се догађа у пракси је да се за заштиту DC струјних кругова у фотонапонским системима користи модуларни аутоматски прекидач за DC струјне кругове (са ниским називним напонима) који имају означен поларитет прикључења. Такви прекидачи имају уграђен трајни магнет који помаже приликом гашења DC лука у случају искључења. Уколико је у таквим заштитним уређајима смер струје обрнут (појава инверзне струје), трајни магнет заправо не помаже гашењу DC лука и лук при искључењу може остати неугашен, односно заштита неће реаговати, што води до последица у виду оштећења опреме и, врло вероватно, до пожара.

Друга велика грешка је употреба прекострујних заштитних топлјивих осигурача типа aR. Ти заштитни елементи имају забрањено подручје оптерећења, због чега им је употреба у фотонапонским системима забрањена.

Аутоматски DC прекидачи који немају означен поларитет се могу користити у фотонапонским апликацијама где постоји опасност од великих инверзних струја. Они имају обједињену функцију топлјивог осигурача и растављача снаге. Користе се најчешће у једносмерним разводним орманима (подразводима) где су присутне веће DC струје.

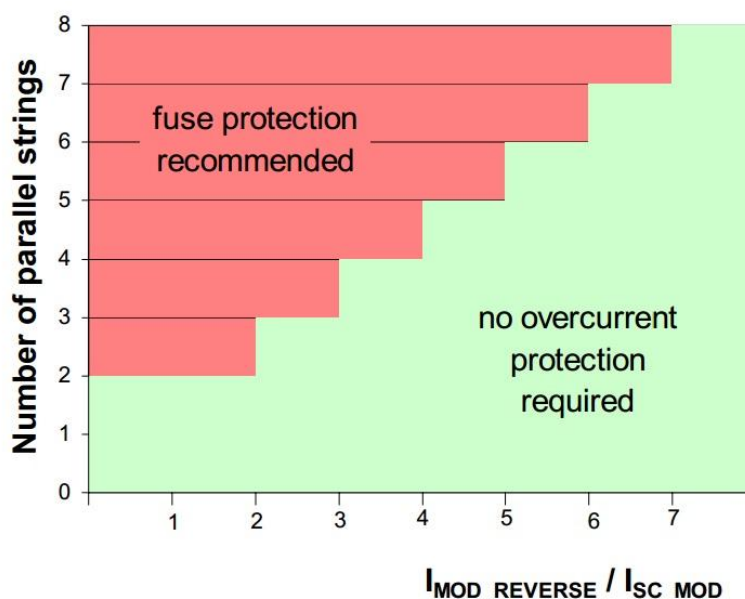
Дакле, приликом одабира опреме поред захтева за опрему прилагођену једносмерним апликацијама, стоји и захтев за употребу у фотонапонским системима.

Због познатих проблема код гашења DC лука приликом прекидања електричног кола, препоручује се прекидање са два или више редно везаних контаката по сваком од полова, + и -.

Закључак:

Број паралелно повезаних стрингова одлучује да ли је потребна уградња осигурача или не. Генерално, у случају једног или два паралелна стринга, није потребна употреба заштитног осигурача, уколико струја квара није изнад вредности дозвољене максималне инверзне струје.

Код система са вишим бројем паралелно повезаних стрингова, препоручује се употреба заштитних осигурача, у зависности од величине максималне дозвољене инверзне струје, што је приказано на следећем дијаграму.



Слика 6.3. Потреба за коришћењем заштитног осигурача у зависности од броја паралелних стрингова и односа инверзне струје и струје кратког споја

2.5. Izbor kablova na DC strani

Најчешће се користе једножилни каблови са максималним дозвољеним једносмерним напоном од 1,8 kV, предвиђени за трајни рад при наизменичном напону до 1000 V, на температурама од -40°C до +90°C. Каблови су потребни да буду отпорни на УВ зрачење, абразију и спољне утицаје, једножилни са финожичним проводницима, који су израђени од бакра или неке од легура. Први слој изолације је најчешће од умреженог полиетилена (XLPE), а спољни омотач (уколико постоји) од поливинил хлорида (PVC-a). Приликом инсталације система препоручује се примена распознавања каблова по бојама у зависности од поларитета једносмерног напона.



Слика 6.4. Једножилни соларни кабл, 1 – финожични бакарни проводници, 2 – изолациони слој, 3 – омотач у боји

На слици 6.4 је приказан типични једножилни кабл који се користи у фотонапонским апликацијама. Соларни каблови су флексибилни, са уплетеним финожичним проводницима, како би се смањио ризик од оштећења проводника током израде инсталације. Честа је израда каблова од материјала који не садрже халогене елементе (*енгл. halogen-free*), а у већини случајева су отпорни на горење.

Због великих температура које се развијају на соларним модулима (температура на соларним модулима може достићи и преко 70°C) потребно је користити каблове са вишом температурном класом изолације. Усвајају се једножилни каблови типа XP00 који имају изолацију од умреженог полиетилена.

Димензионисање напојних водова врши се на основу:

1. дозвољеног термичког оптерећења
2. дозвољеног процентуалног пада напона.

2.5.1. Дозвољено термичко оптерећење

Кабл или проводник је изабран тако да пројектована струја I_B буде мања од струје заштитне компоненте I_n , а она мања од трајно дозвољене струје I_Z , која представља табличну трајно дозвољену струју проводника или кабла (I_{trdoz}), кориговану одређеним факторима (SRPS HD 60364-52, 2012).

$$I_Z = K_\theta K_n I_{trdoz} \quad (7)$$

где је:

- I_{trdoz} - трајно дозвољена струја проводника или кабла, таблични податак,
- K_θ - корекциони фактор за температуру, таблични податак, и
- K_n - корекциони фактор за групно положена струјна кола, таблични податак.

Кабл је предвиђен за полагање у ваздуху по металној конструкцији фотонапонских модула и даље у перфорираним носачима каблова.

Прорачун:

Коефицијент групног вођења се одређује за 12 једножилних каблова који су једнако струјно оптерећени (за сваки од инвертора, 6 стрингова по два проводника): $k_n = 0.45$.

Коефицијент температурне корекције се одређује према максималној температури соларних модула од 70°C, изолација од умреженог полиетилена: $k_\theta = 0.58$.

Термичка струја према којој се одређује пресек проводника (одређена према трајно очекиваној струји I_n) износи

$$I_{trdoz} = \frac{I_n}{K_\theta K_n} = \frac{12A}{0,45 \cdot 0,58} = 45,98 A$$

За начин полагања Б1 и за претходно добијену вредност струје усваја се кабл **XP00 1 x 6 mm²**. Дозвољена струја (SRPS IEC 60365-5-52, 2012) за пресек од 6 mm², изолација од умреженог полиетилена, начин полагања Б1, износи 54А (ово је податак за кабл са два оптерећена проводника; за кабл са једним оптерећеним проводником дозвољена струја је већа).

Оваквим каблом се везује свака паралелна грана фотонапонских модула на инвертор. Кабл се поставља и између сваког ФН модула у сваком од ФН стрингова.

2.5.2. Прорачун падова напона у DC колима

Код фотонапонских система пракса је да се провере губици електричне енергије на DC и AC страни система. Разлог за ово је висока цена (*feed-in тарифа*) којом се плаћа енергија која се испоручује у мрежу, чиме губици у делу система пре обрачунског бројила добијају на значају.

Препоручене и усвојене вредности падова напона и губитака снаге су:

- За DC струјна кола пад напона и губици снаге до 1,5 % (критично све изнад 1,5 % за пад напона и 1,5 % за губитке у снази), и
- За AC струјна кола пад напона до 1,5 % и губици снаге до 1,5 % (критично све изнад 1,5 % за пад напона и 2 % за губитке у снази).

За инсталације чија је дужина већа од 100 м, дозвољени пад напона повећава се за 0,005 % по дужном метру преко 100 м, али не више од 0,5 %.

Отпорност проводника је рачунат по формули:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (8)$$

док се процентуални пад напона по стрингу фотонапонског модула рачуна према изразу:

$$\Delta u = 2 \cdot 100 \cdot \frac{Pl\rho}{U^2S} (\%) \quad (9)$$

Δu – процентуални пад напона (%);

P – снага (W);

l – дужина кола (m);

U –напон (V);

S – пресек проводника (mm^2);

ρ - специфична отпорност проводника ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$), за бакар $\rho = 0.01816 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Прорачун:

За највећу дужину трасе од 60 м, до последњих фотонапонских модула на конструкцији, за најкритичнији случај са становишта пада напона има се (струја на било којој од деоница је иста):

$$\Delta u_{DC} = 2 \cdot 100 \cdot \frac{19 \cdot 241.3 \cdot 60 \cdot 0.01816}{476.34^2 \cdot 6} (\%) = 0.73 \% < 1.5 \%$$

Закључак:

Одабрани кабл задовољава прописани услов са становишта пада напона.

Уколико постоје подразводи (једносмерни разводни ормани), релевантан за анализу је укупни пад напона на деоници од најудаљенијег фотонапонског панела до улаза у инвертор.

2.6 Заштита од пренапона

Пренапонска заштита је заштита коју је потребно извести на фотонапонским системима. Пренапон се у фотонапонским системима појављује услед атмосферског пражњења и индукваних напона у петљама стрингова. Повећани напон може бити последица температурне зависности напона самих фотонапонских модула.

Одводник пренапона (*енгл. Surge Protective Device, скраћено SPD*) се састоји од нелинеарне компоненте, метал-оксидног варистора (*енгл. Metal Oxide Varistor, скраћено MOV*) и термичке заштите, која при преоптерећењу, односно загревању при преоптерећењу искључује MOV из електричног круга.

Као код одабира величине струјног осигурача и код одабира пренапонске заштите потребно је узети у обзир максималне напоне који се могу јавити у колу и на основу њих одредити називни напон одводника пренапона (U_c).

О овоме је раније било речи (видети формуле (1) и (2)).

Слично се може десити и када се појави квар на инвертору без трансформатора. Све више инвертора данас користе технологије IGBT-а, без трансформатора. Познато је да су ти инвертори ефикаснији, имају мању тежину и јефтинији су, али се код истих догађаја да, приликом квара IGBT-а, долази до пробоја са AC стране на DC страну. Тада на DC страни имамо напон величине $U_{DC} + U_{AC}$.

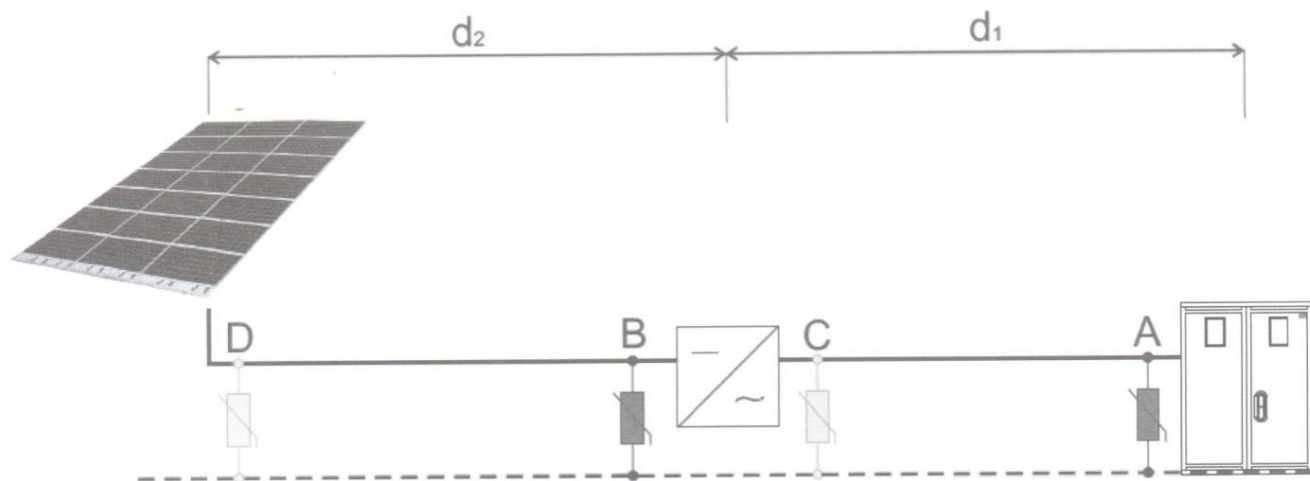
Код фотонапонских система користе се два типа одводника пренапона, тип 1 и тип 2.

Тип 1 је намењен директним ударима грома и зато је уграђен већи MOV који подноси много више енергије (10/350 ns).

Тип 2 је намењен само индиректним ударима, има мањи варистор који не подноси веће енергије и јефтинији је. Постоји опште правило да се код система без громобрана може

употребити тип 2, док код система са громобранском заштитом потребно је употребити одводник пренапона типа 1. Поред присуства громобрана, на одабир типа одводника пренапона утиче и растојање компоненти фотонапонског система.

На слици 6.6 је графички приказан пример једног фотонапонског система.



Слика 6.5. Шема фотонапонског система и места постављања пренапонске заштите (A – AC дистрибутивни орман са бројилом, B – DC разводни орман, C – AC излаз инвертора, D – DC спојни орман, уколико постоји потреба).

Дакле, за ситуације где су раздаљине d_1 и d_2 мање од 10 метара није потребно поставити одводнике пренапона.

Код громобранске заштите на DC страни понекад је довољна употреба одводника пренапона типа 2, јер је на DC страни већи радни напон, такође и U_C (називни напон) у односу на AC страну. Због тога ће код директног удара у громобран прво реаговати одводник типа 1 на AC страни, због мањег U_C . Примери одабира типа одводника пренапона по IEC 62305 стандарду:

Ситуација 1: Фотонапонски систем без громобрана

Потребно је у тачке A и B поставити одводник пренапона тип 2; ако су удаљености $d_1 > 10$ м додаје се одводник типа 2 у тачку C, а ако је $d_2 > 10$ м додаје се одводник типа 2 у тачку D.

Ситуација 2: Фотонапонски систем са изолованим системом громобранске заштите, без галванске повезаности са металним деловима фотонапонског система

Стандард IEC 62305. дефинише удаљеност између громобрана и фотонапонских модула.

Потребно је у тачку A ставити одводник тип 1, а у тачку B одводник тип 2, без обзира на удаљености d_1 и d_2 . За удаљености $d_1 > 10$ м додаје се одводник типа 1 у тачку C, и за $d_2 > 10$ м додаје се одводник типа 2 у тачку D.

Ситуација 3: Фотонапонски систем са неизолованом громобранском заштитом, постоји галванска повезаност са свим металним деловима система.

У том случају не постоји удаљеност између громобрана и фотонапонских модула јер су на истом потенцијалу.

Потребно је у тачку А ставити одводник тип 1, без обзира на удаљености d_1 и d_2 , а у тачку В зависи од удаљености d_2 . За удаљености $d_2 < 10$ м додаје се одводник типа 2 у тачку В, а за $d_2 > 10$ м додаје се одводник типа 1 у тачку В, а у тачку Д се додаје тип 1. За случај када је $d_1 > 10$ м додаје се одводник типа 1 у тачку С.

Прорачун:

Улазни подаци:

- 60 м растојање најудаљенијег панела до инвертора, и
- рамови панела и метална носећа конструкција су повезани на уземљивач на који је повезана и громобранска инсталација.

Важи прорачун од раније за одабир напонског нивоа пренапонске заштите на DC страни:

$$V_{DC\ max} = 19 \cdot U_{oc} = 19 \cdot 37.67 \cdot \left(1 + (-19.25 - 25) \cdot \left(-\frac{0.34}{100} \right) \right) = 823.41\ V$$

На основу овога, из каталожских података опреме усваја се напонски ниво од 1000 V DC.

Присутан је случај (ситуација) 3 где је потребно:

- поставити одводник пренапона тип 1 у тачки В са слике 6.6., и
- не постоји потреба за постављањем DC ормана, одводника пренапона нема у тачки Д са слике 6.6.