

SISTEME FOTOVOLTAICE

I. Istoricul tehnologiilor fotovoltaice

Termenul „*fotovoltaic*” derivă din combinația cuvântului grec *photos*, ceea ce înseamnă lumină și numele unității de măsură a tensiunii - *volt*. Astfel, tehnologia fotovoltaică (PV) descrie procesul de generare a electricității cu ajutorul luminii. În anul 1839, în perioada revoluției industriale, Alexandru Edmond Becquerel, tatăl Laureatului Premiului Nobel Henri Becquerel, a descoperit efectul fotovoltaic, care explică cum poate fi generată electricitatea de către lumina solară. El a conchis că „*iluminarea unui electrod afundat într-o soluție conductivă va crea un curent electric*”.

Însă, în pofida unor cercetări extensive, după această descoperire, conversia fotovoltaică continuă să fie ineficientă. Celulele fotovoltaice erau utilizate mai mult pentru propuneri de măsurare a intensității luminii. Primul raport asupra efectului fotovoltaic sau *fotoelectric*, cum era numit la timpul respectiv, a fost făcut de savanții din Cambridge, W. Adams și R. Day în 1877, unde sunt descrise schimbările care au loc într-o placă de seleniu, expusă luminii. În experiențele sale, Heinrich Hertz a observat, în anul 1887, că o placă din zinc se încarcă cu sarcină pozitivă dacă este expusă unei radiații ultraviolete. Fenomenul se datorează aceluiași efect fotoelectric: sub acțiunea razelor ultraviolete din metal sunt eliminați electroni, și în consecință metalul se încarcă pozitiv.

Prima celulă PV a fost construită de electricianul american Charles Fritts în 1883 pe bază de seleniu și a fost patentată în anul 1884. Construcția celulei era foarte asemănătoare cu celulele de astăzi. Dar eficiența celulei era mai mică de 1% și nu a fost utilizată industrial.

După aproximativ un secol de la prima descoperire a efectului, Albert Einstein a primit premiul Nobel în fizică în 1921 pentru explicarea efectului fotoelectric, fapt care a permis utilizarea practică a celulelor fotovoltaice. În anul 1946, Russell Ohl a inventat celula solară, urmată de inventarea în anul 1947 a tranzistorului.

La mijlocul secolului al XX-lea, savanții și inginerii au revenit asupra studiului efectului fotovoltaic, care are loc în semiconductoare. În anul 1953, echipa de ingineri de la Telephone Laboratories (Bell Labs) D. Chapin, C. Fuller și G. Pearson creează celula PV din siliciu cu o eficiență cu mult mai mare decât celula din seleniu. În următorul an, aceeași echipă construiește o celulă din siliciu cu un randament de 6%. În același timp apar și primii consumatori de energie fotovoltaică – sateliții artificiali. În anul 1957, celule PV au fost instalate pe primul satelit artificial al pământului „*Sputnic 3*”, iar în anul 1958 celulele PV au fost instalate la bordul satelitului american „*Vanguard 1*” și serveau pentru alimentarea unui emițător radio. Până în prezent, celulele PV sunt cele mai recomandate surse de energie pentru tehnica spațială. Competiția între SUA și ex-URSS din anii 60 ai secolului trecut în domeniul surselor de alimentare cu energie electrică a sateliților a condus la o dezvoltare spectaculoasă a tehnologiei PV și s-a produs o ruptură în dependența rigidă a energiei descentralizate de sursele tradiționale: grupuri electrogene, baterii de acumulate sau baterii uscate.

Prin folosirea efectului fotovoltaic are loc conversia directă a luminii solare în energie electrică. Tehnologia conversiei directe exclude transformările intermediare: radiația solară în energie termică, energia termică în energie mecanică, energia mecanică în energie electrică de curent alternativ. Conversia directă se realizează cu ajutorul materialelor semiconductoare, folosind *efectul fotovoltaic*. Spre deosebire de generatorul electromecanic, generatorul fotovoltaic, așa-numita *celulă fotovoltaică*, produce energie electrică de curent continuu. Excluderea din lanțul tehnologic al transformărilor intermediare, lipsa mișcării, zgomotului, vibrațiilor, existența unei construcții modulare, durata de exploatare de peste 25 de ani, sunt argumente pentru a afirma că viitorul energiei descentralizate va aparține tehnologiei fotovoltaice.

II. Celula fotovoltaică: caracteristici și parametri tehnici

II.1. Construcția și principiul de funcționare

Celula fotovoltaică este un dispozitiv opto - electronic, a cărui funcționare se datorează efec-

tului generării de către lumină a purtătorilor de sarcină liberi și separarea lor de către câmpul electric intern a al joncțiunilor p - n, MOS sau Schottky. Ca material inițial pentru fabricare se utilizează, de obicei, siliciu cristalin sau policristalin, în care prin diverse metode tehnologice se formează straturi cu conductibilitate diferită pentru a obține joncțiunea p - n. Materialul semiconductor de bază care se folosește pentru producerea celulelor PV este siliciul.

În tabelul III.1 se prezintă randamentul conversiei PV bazate pe trei tipuri de materiale fotovoltaice: siliciu cristalin, siliciu policristalin și siliciu amorf.

Tabelul III.1. Comparatie între materialele pentru celulele PV

Materialul celulei solare	Siliciu cristalin	Siliciu policristalin	Siliciu amorf
Randamentul conversiei energiei (%)	15-22	14-15	7-10

Din punctul de vedere al cotei de participatie pe piața mondială a diferitelor tehnologii de producere a celulelor PV, se poate afirma că peste 84% din producția mondială de celule PV este bazată pe siliciu policristalin și cristalin. În prezent, tehnologia siliciului policristalin și cristalin este cea mai avansată, asigurând producerea de module PV la scară industrială cu un randament de 14 - 17% și cu o durată de viață a modulelor de 30 de ani. Dar această tehnologie are un dezavantaj esențial: este potențial limitată din punctul de vedere al scăderii în viitor a costurilor de producere a celulelor PV. Experți în domeniu consideră că, producerea unui watt nu va scădea mai jos de 2 €. Din acest punct de vedere, tehnologia siliciului amorf și a siliciului în straturi subțiri are o perspectivă mai promițătoare. Costul unui watt produs cu aceste tehnologii va scădea până la 1 € - cost limită la care energia electrică PV devine mai ieftină decât energia electrică produsă din surse fosile. Se presupune că din aceste motive, în ultimii ani se constată o redistribuire a pieței mondiale în favoarea tehnologiei siliciului amorf și în straturi subțiri.

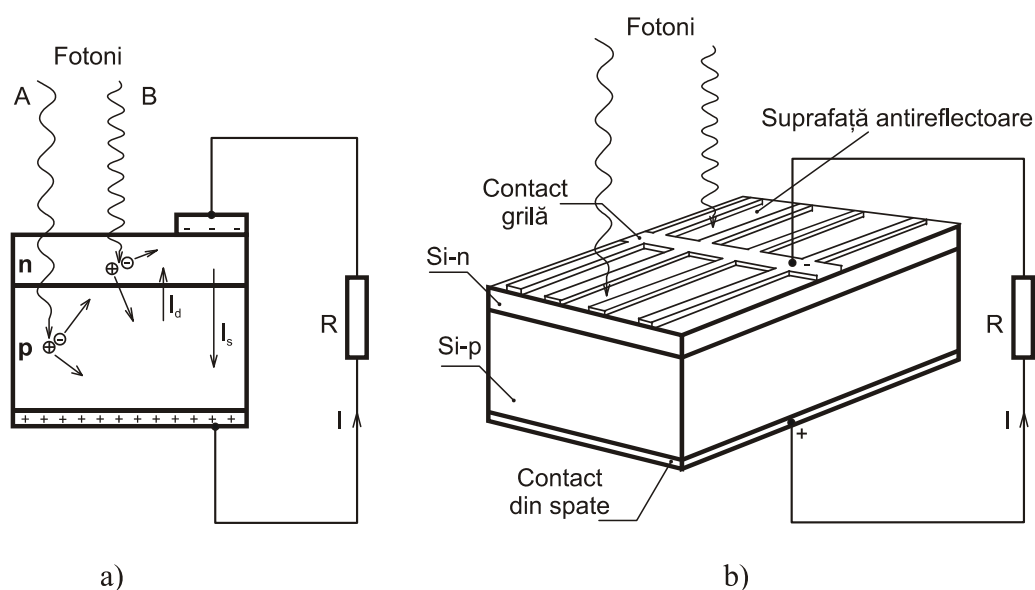


Fig. III.1. Schema constructivă a celulei fotovoltaice.

În fig. III.1, este prezentată schema constructivă simplificată a celulei PV, având la bază material semiconductor de tip p. Să analizăm fenomenele care au loc dacă celula PV este expusă unei radiații incidente (fig. III.1). Această radiație poate fi echivalată cu un flux de fotoni, care au energia: $E = h\nu$, unde h este constanta lui Planck, iar ν este frecvența fotonilor. Dacă energia fotonului este mai mare ca energia benzii energetice interzise a semiconductorului, atunci, în urma interacțiunii fotonului cu un atom, electronul din banda de valență va trece în banda de conducție, devenind liber, generând, totodată, un gol în banda de valență. Astfel, sub acțiunea fotonilor, are loc generarea de perechi electroni - goluri. Acest efect se mai numește *efect fotovoltaic interior*. În figura III.1,

a), fotonul A are o frecvență mai mică și, deci, o energie mai mică, iar fotonul B are o frecvență mai mare și, corespunzător, o energie mai mare (unda electromagnetică cu frecvență mică pătrunde în material la adâncimi mai mari și invers).

Purtătorii de sarcină liberi sunt separați de câmpul electric al joncțiunii $p - n$, caracterizat prin potențialul de barieră U_0 și care, în funcție de tipul semiconductorului folosit, este de circa $0,2 - 0,7 V$. Aici, câmpul electric va avea rolul de separator de sarcini libere: perechi electroni - goluri. Electronii vor fi dirijați spre zona n , golurile - spre zona p a celulei. Acesta este motivul pentru care, sub influența luminii, zona p se încarcă pozitiv, iar zona n se încarcă negativ, ceea ce conduce la apariția unui curent electric prin circuitul extern, determinat de conversia fotovoltaică a radiației solare. Acest curent, (fig. III.1, a), determină o cădere de tensiune U pe sarcina externă R , conectată la contactele din spate și contactul - grilă frontal (fig. III.1, b). Tensiunea U , în raport cu joncțiunea $p - n$ acționează în sens direct și, la rândul său, va determina prin joncțiune curentul diodei I_d , de sens opus curentului fotovoltaic I_s , care se determină din expresia cunoscută:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (III.1)$$

în care: I_0 este intensitatea curentului de saturație, k - constanta lui Boltzman, T - temperatura absolută și e este sarcina electronului.

II.2. Caracteristicile celulei fotovoltaice

Caracteristicile principale ale celulei PV sunt: caracteristica amper-volt $I(U)$ sau volt - amper $U(I)$ și caracteristica de putere $P(U)$. Curentul în circuitul exterior I se determină ca diferență dintre curentul fotovoltaic I_s și curentul diodei I_d .

$$I = I_s - I_d = I_s - I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (III.2)$$

Ecuatiei (III.2) îi corespunde schema echivalentă simplificată a celulei PV, prezentată în figura III.2, a). Dacă se ține seama de rezistența R_i de scurgeri prin joncțiunea $p - n$ a celulei PV și de rezistența serie a celulei R_s , se poate întocmi o schemă echivalentă completă a celulei PV (figura III.2, b). Cu tehnologiile moderne se obțin celule cu $R_i = \infty$ și $R_s = 0$, astfel încât schema echivalentă simplificată este satisfăcătoare.

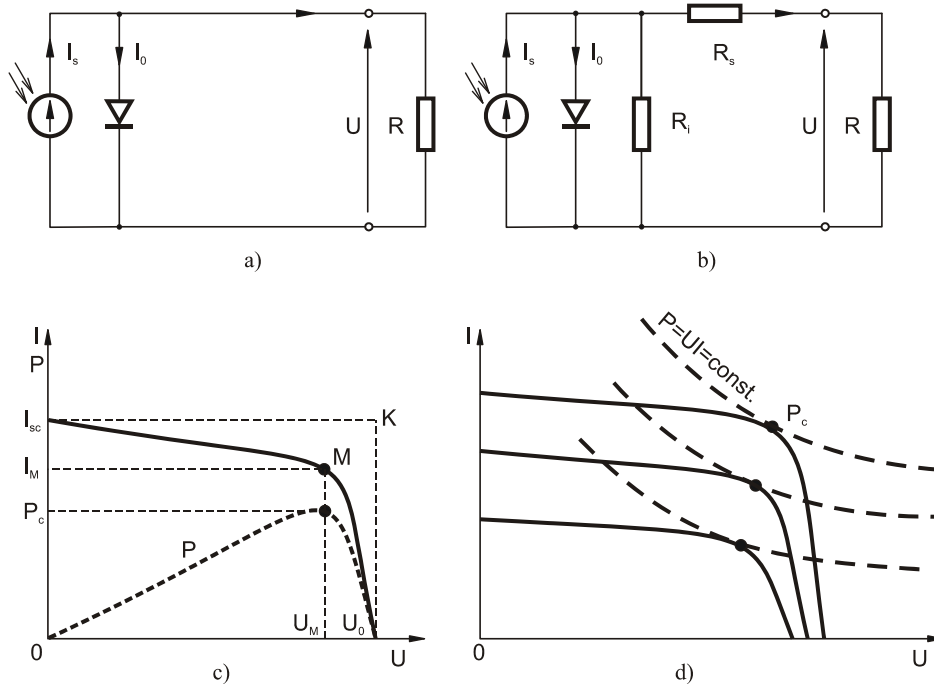


Fig. III.2. Scheme echivalente ale celulei PV: a) - simplificată; b) - completă; c), d) - caracteristicile celulei.

Puterea electrică cedată sarcinii R a unei celule PV este:

$$P = U \cdot I = U \left\{ I_s - I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \right] - 1 \right\}. \quad (III.3)$$

Valoarea maximă a acestei puteri se obține într-un punct M al caracteristicii curent – tensiune, ale cărui coordonate rezultă din condiția $dP/dU = 0$:

$$\begin{aligned} U_M &= U_0 - U_T \ln\left(1 + \frac{U_M}{U_T}\right) \\ I_M &= I_s \left(1 + \frac{I_0}{I_s}\right) \frac{U_M}{U_M + U_T}, \end{aligned} \quad (III.4)$$

în care $U_T = kT/e$.

Pentru o sarcină pasivă, valoarea optimă a rezistenței de sarcină va fi:

$$R_M = \frac{U_M}{I_M}. \quad (III.5)$$

II.3. Parametrii celulelor și modulelor PV

În cartea tehnică a produsului, producătorii de celule și module PV indică parametrii ridicați în condiții standard:

- radiația solară globală pe suprafața celulei, $G=1000 \text{ W/m}^2$;
- temperatura celulei, $T = 25^\circ\text{C}$;
- masa convențională de aer, $AM=1,5$.

În mod obligatoriu, în cartea tehnică se prezintă: curentul de scurtcircuit, I_{sc} ; tensiunea de mers în gol, U_0 ; puterea maximă sau critică, P_c ; tensiunea și curentul în punctul critic, U_M și I_M . Pe lângă acești parametri, pot fi indicați suplimentar: factorul de umplere (Fill Factor), FF ; randamentul celulei sau modulului PV, Temperatura Normală de Funcționare a Celulei $NOCT$, coeficienții de variație a tensiunii de mers în gol și a curentului de scurtcircuit cu temperatura.

II.3.1. Curentul de scurtcircuit

Se obține la scurtcircuitarea bornelor sarcinii R din fig. III.2. Pe caracteristica $I(U)$, acesta este punctul cu coordonatele $U = 0$, $I = I_{sc}$. Din expresia (III.2), pentru $U = 0$, obținem $I_{sc} = I_s$. Puterea furnizată este egală cu zero.

II.3.2. Tensiunea de mers în gol

Correspunde punctului de pe caracteristica $I(U)$ cu coordonatele $I = 0$, $U = U_0$. Puterea debitată în acest punct este egală cu zero. Tensiunea de mers în gol poate fi determinată din (III.2) pentru $I = 0$:

$$U_0 = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_s + I_0}{I_0} \approx \frac{kT}{e} \ln \frac{I_s}{I_0}. \quad (III.6)$$

Pentru o celulă din siliciu raportul I_s/I_0 este de circa 10^{10} , factorul kT/e , numit și *tensiune termică*, este egal cu 26 mV . Astfel $U_0 = 0,6 \text{ V}$.

II.3.3. Puterea critică (maximă)

Este produsul dintre curent și tensiune în punctul M a caracteristicii $I(U)$. În engleză acest parametru se numește *peak power* și se notează P_c :

$$P_c = U_M \cdot I_M. \quad (III.7)$$

Din punct de vedere geometric, puterea critică P_c corespunde punctelor de tangență ale hiperbolelor $P = UI = \text{const.}$ la caracteristicile amper - volt $I(U)$ (conform figurii III.2, d).

II.3.4. Factorul de umplere (Fill Factor)

Se determină ca raport între suprafețele dreptunghiurilor OU_MMI_M și OU_0KI_{sc} (conform figurii III.2, c) sau

$$FF = \frac{U_M I_M}{U_0 I_{sc}} \quad (III.8)$$

sau

$$P_c = FF \cdot U_0 \cdot I_{sc} \quad (III.9)$$

Factorul de umplere este măsura calității celulei PV. Cu cât este mai mică rezistența internă R a celulei PV, cu atât FF este mai mare. De obicei $FF > 0,7$.

II.3.5. Randamentul celulei sau modulului PV

Se determină ca raportul dintre puterea generată de celula sau modulul PV în punctul optim de funcționare M la o temperatură specificată și puterea radiației solare

$$\eta = \frac{P_c}{A \cdot G} \quad (III.10)$$

în care P_c este puterea debitată în W ; A este suprafața celulei sau modulului în m^2 ; G - radiația globală incidentă pe suprafața celulei sau modulului în W/m^2 .

Un modul PV cu randamentul de 12% și aria suprafeței de $1 m^2$, expus la radiație solară egală cu $1000 W/m^2$ va produce aproximativ $120 W$.

În condiții de laborator au fost obținute celule din siliciu cristalin cu un randament de 13 - 25% în funcție de suprafața celulei, iar în condiții de fabrică - 12 - 14%. Randamentul celulei din siliciu policristalin este de până la 20% în condiții de laborator. Limita teoretică a randamentului celulei din siliciu cristalin este de 37%, iar a celei din siliciu amorf, de 28%.

II.3.6. Temperatura normală de funcționare a celulei

Corespunde temperaturii celulei PV la funcționare în gol la temperatura mediului de $20^\circ C$, radiația globală de $800 W/m^2$ și viteza vântului mai mică de $1 m/s$. Pentru celule uzuale, parametrul NOCT se situează între 42 și $46^\circ C$. Dacă este cunoscut parametrul NOCT, se poate determina temperatura celulei T_c în alte condiții de funcționare caracterizate de temperatura mediului T_A și radiația globală G :

$$T_c = T_A + \left(\frac{NOCT - 20}{0,8} \right) \cdot G \quad (III.11)$$

II.3.7. Influența radiației solare și a temperaturii asupra caracteristicilor celulelor și modulelor PV

Caracteristicile celulei PV pentru diferite valori ale radiației solare sunt prezentate în figura III.3, a). După cum se observă, curentul de scurtcircuit este direct proporțional cu radiația solară, iar tensiunea de mers în gol variază puțin, deoarece, conform relației (III.6), tensiunea U_0 depinde logaritmic de radiația solară (I_s este proporțional cu radiația) și adesea în calcule practice această variație se neglijează. Curentul de scurtcircuit, pentru diferite valori ale radiației solare G , poate fi determinat cu o aproximație satisfăcătoare, prin formula:

$$I_{sc} = \frac{G}{G_{st}} \cdot I_{scst} \quad (III.12)$$

unde I_{scst} este curentul de scurtcircuit al celulei corespunzător radiației standard $G_s = 1000 W/m^2$.

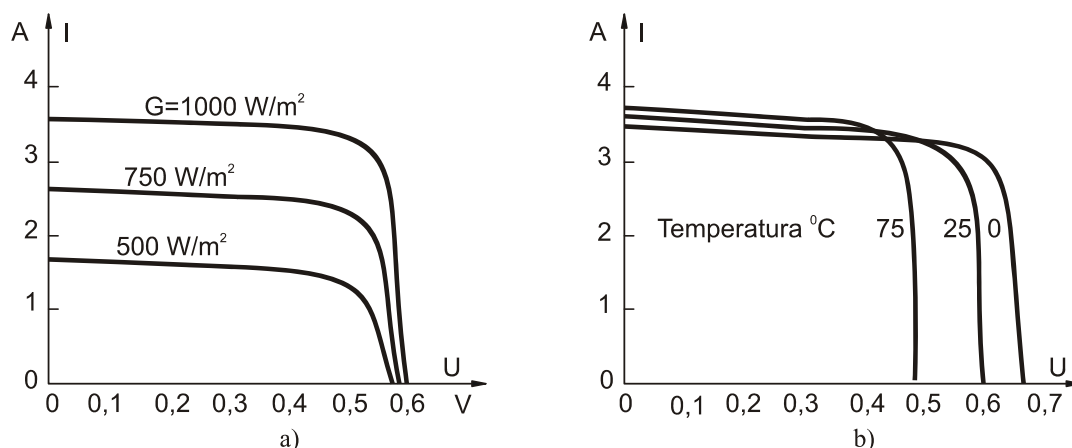


Fig. III.3. Caracteristicile celulei PV la variația energiei solare (a) și a temperaturii (b).

Temperatura celulei PV influențează semnificativ asupra tensiunii de mers în gol și cu mult mai puțin asupra curentului de scurtcircuit (conform figurii III.3, b). O dată cu creșterea temperaturii, tensiunea de mers în gol scade. Pentru celule din siliciu, coeficientul de variație a tensiunii cu temperatura K_T este egal cu $2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Astfel, parametrul U_0 pentru temperaturi diferite de cea standard se va calcula cu relația:

$$U_0 = U_{025} - 0,0023(t - 25), \quad (\text{III.13})$$

unde U_{025} este tensiunea de mers în gol a celulei PV la temperatura standard; iar t - temperatura curentă a celulei, în $^\circ\text{C}$. În calculele de proiectare, variația curentului de scurtcircuit și a factorului de umplere FF în funcție de temperatură sunt neglijate.

III. Module fotovoltaice

Celulele fotovoltaice de construcție modernă produc energie electrică de putere care nu depășește 1,5 - 2 W la tensiuni de 0,5 - 0,6 V. Pentru a obține tensiuni și puteri necesare consumatorului, celulele PV se conectează în serie și/sau în paralel. Cea mai mică instalație fotoelectrică formată din celule PV interconectate în serie și/sau în paralel, încapsulate pentru a obține o rezistență mecanică mai mare și a proteja celulele de acțiunea mediului se numește **modul fotovoltaic**. Un număr de module PV asamblate mecanic ca o unitate mai mare și conectate electric poartă denumirea de **panou** sau **câmp de module**. În acord cu standardele Comisiei Internaționale de Electrotehnică (IEC) se utilizează termenul "array", ceea ce înseamnă sistem, rețea. Expresiile "modul fotovoltaic", "panou fotovoltaic" sau "câmp de module" deseori au una și aceeași semnificație. La proiectarea modulelor PV se ia în considerație folosirea frecventă a modulelor PV pentru încărcarea acumulatorilor electrice, a căror tensiune este de 12 - 12,5 V. Astfel, în condiții de radiație standard, tensiunea U_M trebuie să fie 16 - 18 V, iar tensiunea de mers în gol de 20 - 22,5 V. O singură celulă generează în gol circa 0,6 V și trebuie să conectăm în serie 33 - 36 de celule pentru a obține tensiunea necesară. Puterea modulului va oscila între 50 și 100 W. Construcția modulului PV (fig. III.4, a) este de obicei dreptunghiulară. Suportul se confecționează din aluminiu și separat de structura laminată a celulelor cu căptușeală, care nu permite pătrunderea umezelii.

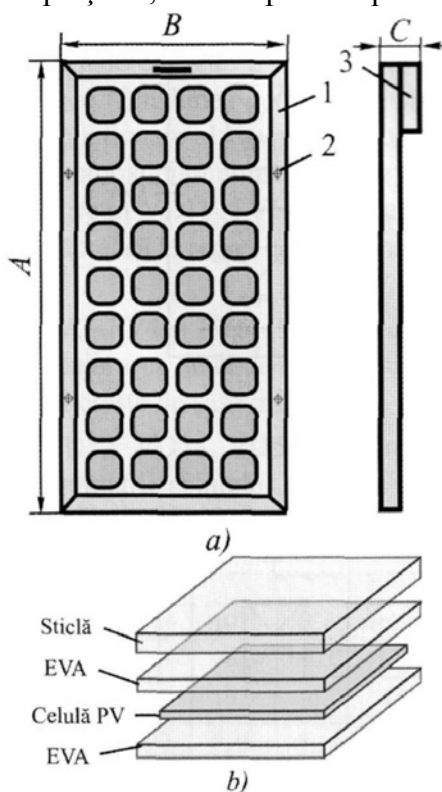


Fig. III.4. a) – construcția modulului PV; b) – încapsularea celulei PV: 1 – suport; 2 – găuri pentru asamblare în panouri; 3 – cutie de borne.

Celulele PV sunt protejate de acțiunea condițiilor nefavorabile, care pot interveni pe parcursul exploatării: ploaie, grindină, zăpadă, praf etc., de un sistem care constă dintr-un strat de sticlă și cel puțin două straturi (din față și din spate) din etilen vinil acetat EVA sau polivinil butirol PVB (fig. III.4, b). Pentru a obține tensiunea și puterea necesare consumatorului de energie electrică, modulele PV pot fi conectate în serie, paralel sau în serie - paralel (conform figurii III.5, a,b,c). La conectarea în serie a două module PV identice curentul debitat consumatorului rămâne același, iar tensiunea crește de două ori. În figura 2.79, a) modulele PV1 și PV2 conectate în serie încarcă bateria de acumuloare GB. Punctul de funcționare a sistemului module PV - GB este punctul de intersecție M al caracteristicilor respective: a două module conectate în serie și a bateriei de acumuloare. Diodele VD1 și VD2 numite *diode de ocolire (by-pass)* se conectează în paralel cu fiecare modul sau cu un grup de module conectate în paralel (figura III.5, a). Dioda *by-pass* limitează tensiunea inversă, dacă un modul din circuitul consecutiv este mai puțin performant sau este umbrat și se evită suprasolicitarea termică. În regim de funcționare normală, diodele VD1 și VD2 nu consumă energie.

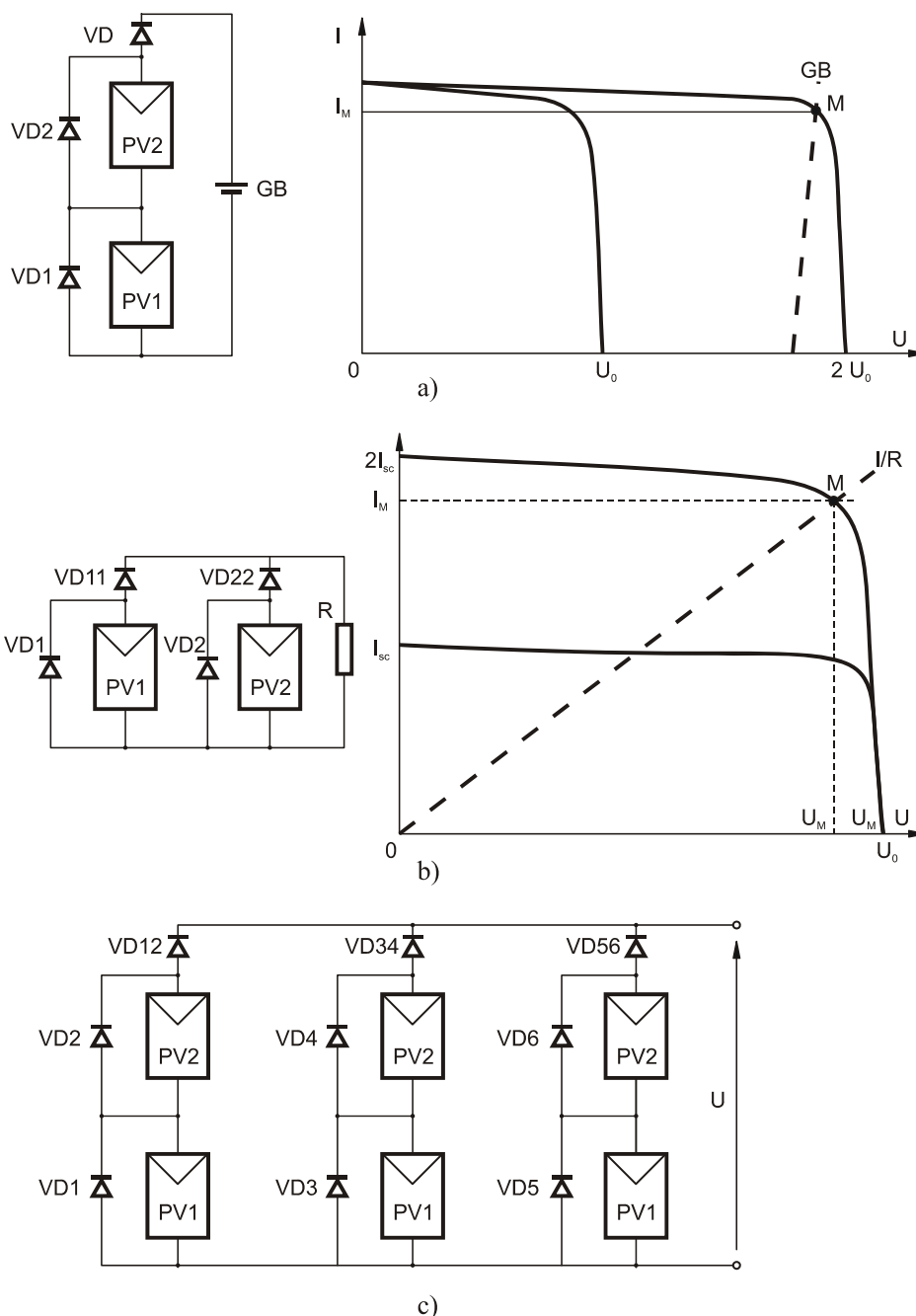


Fig. III.5. Interconexiunea modulelor PV: a) – în serie; b) – în paralel; c) – în serie-paralel.

Dioda VD, numită *antiretur*, se conectează în serie cu sarcina. Această diodă evită situația când modulul PV poate deveni consumator de energie, dacă tensiunea generată va fi mai mică decât a acumulatorului. Este evident că ea introduce o cădere de tensiune de circa 0,5V și, corespunzător, pierderi de energie. În figura III.5, b) se prezintă conectarea în paralel a două module identice. Tensiunea generată rămâne aceeași, iar curentul crește de două ori. Punctul de funcționare al sistemului module PV - rezistența R este punctul de intersecție M al caracteristicilor amper - volt ale modulelor și consumatorului: $I = (1/R)U$. Diodele antiretur VD11 și VD12 nu permit ca un modul sau un grup de module unite în paralel să treacă în regim de consumator, atunci când nu sunt identice sau când sunt umbrite.

În schema din fig. III.5, c) modulele PV1- PV2, PV3 - PV4 și PV5 - PV6 sunt conectate în serie, dar între ele sunt conectate în paralel. Astfel, se obține majorarea de două ori a tensiunii și de trei ori a curentului. Evident, puterea instalației crește de șase ori.

IV. Sisteme fotovoltaice

IV.1. Structura unui sistem fotovoltaic

Celulele sau modulele PV nu sunt unicele componente ale unui sistem PV. Pentru alimentarea continuă a consumatorului cu energie electrică, multe sisteme PV conțin acumuloare de energie electrică. Modulul PV reprezintă un generator de curent continuu (c.c.), dar adesea consumatorul de energie este de curent alternativ. Energia electrică PV are un caracter variabil, alternanța zi/noapte, cer senin/cer acoperit provoacă variația într-o gamă largă a fluxului de energie și a tensiunii generate de modulul PV. Astfel, apare necesitatea condiționării fluxului de energie, folosind convertoare electronice: c.c./c.c., care îndeplinesc și funcția de monitorizare a procesului încărcare/descărcare a acumulatorului și convertoare c.c./c.a. - pentru transformarea curentului continuu în curent alternativ. Pentru a evita supradimensionarea sistemului fotovoltaic adesea se folosește o sursă auxiliară de energie, fie un grup electrogen, fie un generator eolian sau chiar rețeaua electrică publică.

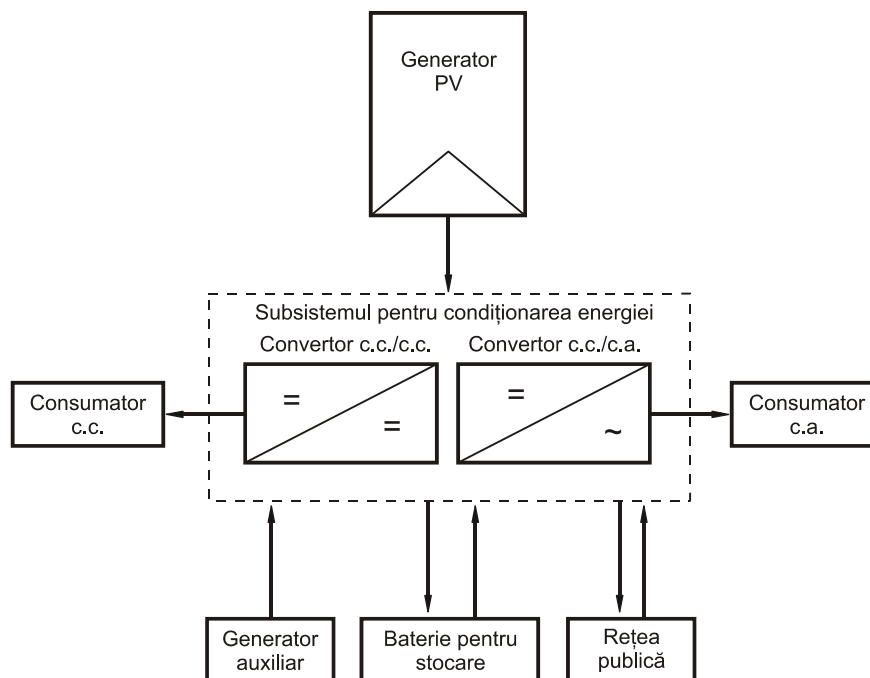


Fig. III.6. Structura unui sistem fotovoltaic.

Toate aceste componente trebuie să fie interconectate, dimensionate și specificate pentru a funcționa într-un sistem unic, numit *sistem fotovoltaic*. În fig. III.6 este prezentată structura unui sistem PV. Principalele componente sunt:

- modulul, panoul, câmpul de module sau, altfel spus, generatorul fotovoltaic.;
- bateria de acumuloare;

- subsistemul pentru condiționarea energiei electrice, care includ și elemente de măsurare, monitorizare, protecție etc;
- sursa auxiliară de energie, de exemplu, un grup electrogen (*back-up generator*), care funcționează cu benzină sau motorină. În acest caz, sistemul PV se mai numește *sistem PV hibrid*.

Sistemele PV se împart în două categorii principale: *conectate la rețea (grid - connected)* sau care funcționează în paralel cu rețeaua electrică publică și *sisteme PV autonome (stand - alone PV system)*. Cel mai simplu sistem este sistemul PV pentru pomparea apei, în care se utilizează pompe cu motoare de c.c. Acest sistem nu conține acumulatori electrice (rezervorul de apă servește drept acumulator) și nici convertoare de c.c./c.a.

Sistemele PV conectate la rețea pot fi divizate în: sisteme PV în care rețeaua electrică publică are rol de sursă auxiliară de energie (*grid back - up*); sisteme PV în care excesul de energie PV este furnizat în rețea (*grid interactive PV system*) și centrale electrice PV (*multi MW PV system*), care furnizează toată energia produsă în rețea.

IV.2. Funcționarea în sarcină a modului PV

În paragraful II.3 s-a menționat că celula PV, respectiv modulul PV, are cele mai bune performanțe în punctul *M* (figura III.2), unde puterea debitată pe sarcină este maximă. Totodată, variația radiației globale și a temperaturii provoacă modificarea caracteristicii $I(U)$ a modului PV. De asemenea, diferiți consumatori posedă diferite caracteristici $I(U)$. În consecință, punctul de funcționare a subsistemului modul PV - sarcină (punctul de intersecție al caracteristicilor $I(U)$ ale modului și sarcinii) nu va coincide cu punctul *M*. În figura III.7 sunt prezentate caracteristicile $I(U)$ a trei dintre cei mai răspândiți consumatori: rezistor, motor de c.c. cu magneți permanenți și un acumulator. Se prezintă și caracteristica unui consumator ideal, pentru care punctul de funcționare coincide întotdeauna cu punctul optim *M*.

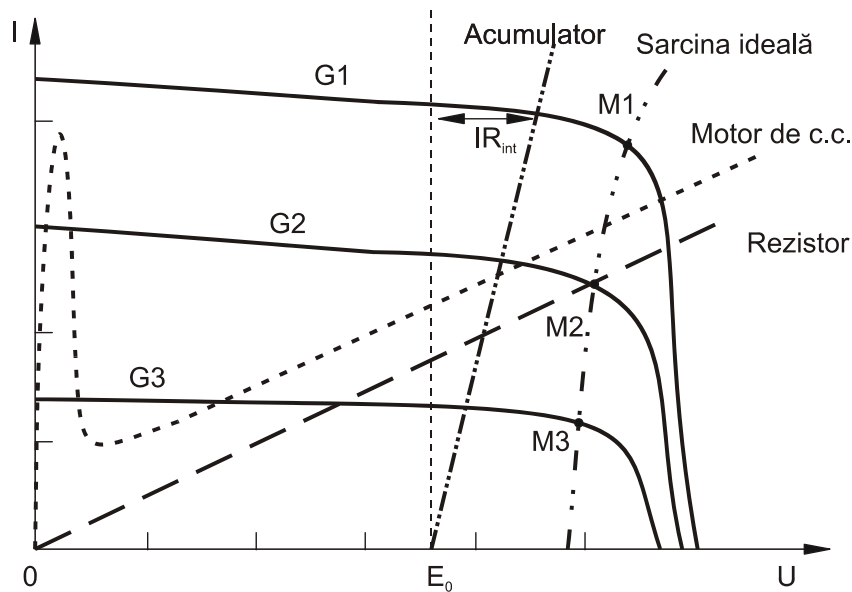


Fig. III.7. Caracteristicile $I(U)$ ale modului PV și ale diferiților consumatori.

Caracteristicile $I(U)$ sunt descrise prin următoarele expresii analitice:

a) rezistor

$$I = \frac{1}{R} U ; \quad (III.14)$$

b) motor de curent continuu

$$I = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - k_e \Omega \Phi}{R_a} ; \quad (III.15)$$

c) acumulator

$$I = \frac{U - E_0}{R_{int}} , \quad (III.16)$$

în care, U este tensiunea modului PV, k_e constanta motorului, Φ fluxul de excitație al motorului, R_a rezistența circuitului indusului, Ω viteza unghiulară a rotorului, E_0 tensiunea la gol a acumulatorului și R_{int} rezistența internă a acumulatorului.

La pornirea motorului de c.c., curentul absorbit de la modul este maxim și este aproape de cel de scurtcircuit. Deși tensiunea pe indus este minimă, pornirea are loc datorită cuplului electromagnetic creat de produsul $k\Phi I_{sc}$. Dacă $U = E_0$, acumulatorul este încărcat și nu va consuma curent, în caz contrar curentul de încărcare va crește o dată cu creșterea radiației globale, respectiv cu tensiunea. O dată cu creșterea curentului de încărcare crește căderea de tensiune IR_{int} .

În figura III.7, se observă că sarcina de tip rezistor sau motor de c.c. nu va funcționa în punctul optim la variația radiației. Va trebui să se modifice caracteristica $I(U)$ modului PV sau a sarcinii pentru a urmări punctul de funcționare optimă. În acest scop se folosesc convertoare electronice c.c./c.c. numite *MPPT* (din denumirea în limba engleză *Maximum Power Point Tracker*).

MPPT se conectează între modulul PV și sarcină, pentru a modifica tensiunea la ieșire, astfel încât să se asigure urmărirea punctului optim de funcționare. În figura III.8 sunt puse în evidență două cazuri de urmărire a punctului maxim folosind tehnologia *MPPT* (figura III.8, a) și prin modificarea sarcinii (figura III.8, b). În primul caz avem două sarcini cu caracteristici $I(U)$ diferite care, pentru simplitate, se admit ca fiind liniare. Pentru ambele sarcini constatăm o deviere esențială a punctelor de funcționare A, B și D, C de la punctele optime $M1$ și $M2$. În același sistem de coordonate sunt trasate hiperbolele $I = P_{max1}/U$ și $I = P_{max2}/U$. În orice punct al hiperbolelor menționate, puterea P_{max1} sau P_{max2} sunt mărimi constante și, respectiv, egale cu puterea maximă debitată în punctele $M1$ sau $M2$.

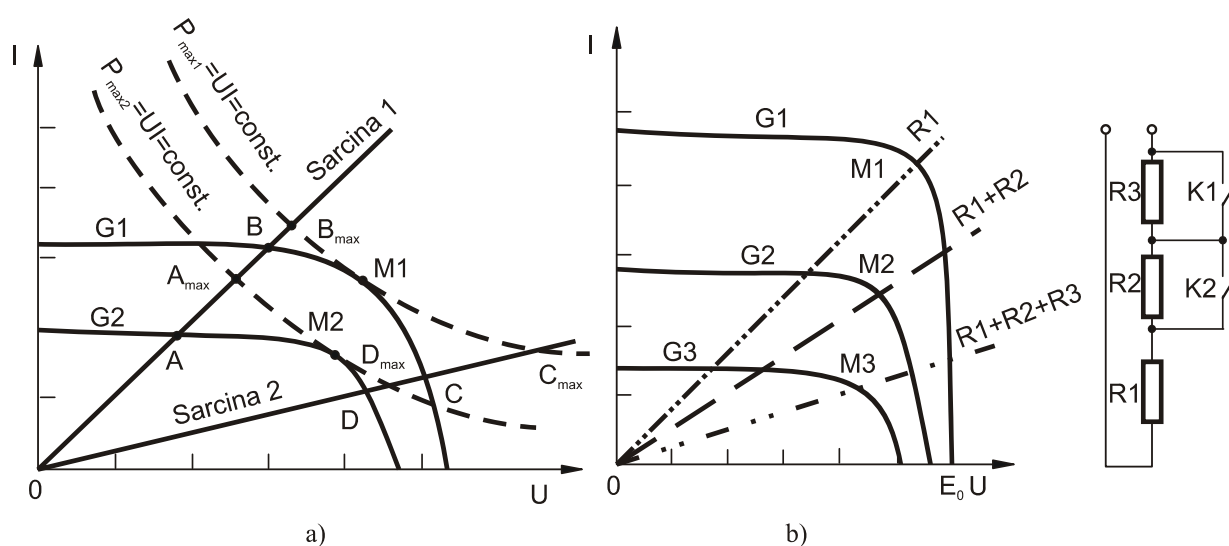


Fig. III.8. Urmărirea punctului de putere maximă: a) – folosind tehnologia *MPPT*; b) – prin modificarea caracteristicii sarcinii.

Se consideră că subsistemul modul PV - Sarcina 1 funcționează în punctul B în condiții de radiație globală egală cu $G1$. Pentru a obține de la modul o putere maximă, ar trebui să se modifice caracteristica $I(U)$ a sarcinii, astfel încât să se intersecteze în punctul $M1$. Același rezultat poate fi obținut dacă se micșorează tensiunea și se mărește curentul în comparație cu punctul $M1$, deplasându-se pe hiperbolă în punctul B_{max} . În mod analog se procedează dacă se micșorează radiația de la $G1$ la $G2$. În cazul sarcinii 2, pentru a urmări punctul maxim va trebui să se procedeze invers: să se majoreze tensiunea și să se micșoreze curentul (se va compara punctul C_{max} cu C sau D_{max} cu D). Convertorul electronic *MPPT* trebuie să modifice tensiunea și curentul, astfel încât la ieșire produsul acestora să fie constant și egal cu puterea maximă generată de modulul PV expus radiației globale G . În unele cazuri specifice, urmărirea punctului de putere maximă poate fi realizat prin modificarea caracteristicii $I(U)$ a sarcinii, așa cum este prezentat în figura III.7, b). Pentru radiația solară maximă și egală cu $G1$, subsistemul modul PV - sarcina $R1$ va funcționa în punctul $M1$; în acest

caz, contactele $K1$ și $K2$ sunt închise. La o valoare medie a radiației solare egală cu $G2$, contactul $K2$ se deschide, caracteristica sarcinii $I(U)$ se modifică și subsistemul va funcționa în punctul $M2$. Dacă radiația solară continuă să se micșoreze, se deschide contactul $K1$ și subsistemul va funcționa în punctul $M3$. Subsistemul "modul PV - acumulator" nu necesită utilizarea tehnologiei MPPT deoarece, dacă se deplasează caracteristica $I(U)$ spre dreapta (figura III.8) ea va fi aproape de cea ideală. În schimb, acumulatorul necesită o supraveghere automată a gradului de încărcare și descărcare pentru a evita deteriorarea acestuia.

Decizia proiectantului de a utiliza sau de a nu utiliza tehnologia MPPT se va lua în funcție de rezultatul calculului economic. Trebuie luate în considerație costul convertorului MPPT, pierderile de energie în MPPT (randamentul convertoarelor moderne c.c./c.c. este de 90 - 95%), respectiv câștigul de putere la funcționarea subsistemului MPPT în regim optim. Conform datelor disponibile, urmărirea punctului de putere maximă în sistemele PV de pompare ridică debitul cu minimum 20%.

Invertorul. Invertorul face parte din subsistemul de condiționare a energiei electrice al sistemului PV (figura III.6) și este componenta principală a convertorului c.c./c.a. Invertorul transformă energia de c.c, generată de modulele PV sau stocată în acumuloare, în energie de c.a. de o frecvență prestabilită. Există în prezent convertoare care asigură parametrii de calitate ai energiei electrice la același nivel ca și rețelele publice: frecvență și tensiune stabilă, forma sinusoidală a undei de tensiune și curent. În funcție de cerințele impuse de sarcină privind forma undei de tensiune, factorul de suprasarcină, randamentul sunt disponibile diferite tipuri de invertoare, ai căror parametri sunt prezentați în tabelul III.2.

Tabelul III.2. Principalii parametri de performanță ai invertoarelor.

Parametri	Tensiune dreptunghiulară	Cvasi -sinusoidală sau în trepte	Modularea impulsurilor în durată (PWM)
Puterea nominală [kW]	Până la 1000	Până la 2,5	Până la 20,0
Factorul de suprasarcină	Până la 20	Până la 4	Până la 2,5
Randamentul [%]	70 - 98	>90	>90
Distorsiunea armonică [%]	Până la 40	>5	<5

Randamentul indicat corespunde funcționării invertorului la o sarcină de 75-100% din puterea nominală. La alegerea invertorului este important să se cunoască caracteristica randamentului în funcție de sarcină. Motoarele electrice necesită un curent de pornire cu mult mai mare decât cel nominal. Este important ca factorul de suprasarcină al invertorului să corespundă acestei necesități.

Invertorul cu undă dreptunghiulară are cea mai simplă schemă, o eficiență relativ bună, este cel mai ieftin, dar provoacă cea mai mare distorsiune armonică, ceea ce produce supraîncălzirea motoarelor. Acest tip de invertor se recomandă spre utilizare în sisteme PV de putere mică pentru iluminare, încălzire la tensiuni diferite de cea de c.c., de asemenea, în componența convertoarelor c.c./c.c., acționărilor electromagnetice. Invertorul cu undă cvasi - sinusoidală este mai complicat, dar relativ eficient. Modularea impulsurilor în durată este o tehnologie mai nouă. Schema de comandă a invertorului este cu mult mai complicată, costul invertorului este mai mare, dar asigură eficiență înaltă și distorsiuni armonice minime.