

Principii

Tematica: *Energii regenerabile*

→ **Capitol:** *Filiera solară*

→ **Secțiunea:** *Panourile fotoelectrice*

Tip resursă: *Expunere* *Laborator virtual / Exercițiu* *CVR*

Această expunere prezintă un scurt istoric al energiei fotoelectrice, apoi noțiunile fundamentale asupra energiei solare.

- cunoștințe anterioare necesare: nu există
- nivel: ciclul întâi
- durata estimată: 1/2 oră
- autori: Lucie Petillon, Jean-Charles Herant, Thimotée Leroy
- realizare: Fabien Poje, Sophie Poumaere
- traducere: [Sergiu Ivanov](#)

Istoric

Helio electricitatea a apărut în 1930, odată cu dezvoltarea celulei cu oxid de cupru și apoi a celei cu seleniu. Abia în 1954 însă, odată cu realizarea în laboratoarele companiei Bell Telephone a primelor celule fotoelectrice cu siliciu, se întrevide posibilitatea obținerii de energie electrică. Foarte rapid utilizate pentru alimentarea vehiculelor spațiale, dezvoltarea și progresele rapide au fost determinate de programele spațiale.

Pe parcursul anilor 1980, tehnologia fotoelectrică terestră a progresat cu regularitate, prin punerea în funcțiune a mai multor centrale de câțiva megawați și prin foarte familiarele produse cu consum redus, cum ar fi ceasuri, calculatoare de buzunar, balize radio și meteo, pompe și frigidere solare. Au contribuit și evenimente cum ar fi cursele de vehicule solare, care oferă imaginea înaltei tehnologii ecologice a viitorului.

Evoluția tehnologiei și a pieței de produse fotoelectrice este în general pozitivă. Ameliorarea metodelor de fabricație, ca și creșterea volumului de producție, au condus la reducerea costurilor. Producția mondială de module fotoelectrice a crescut de la 5 MW-vârf (MWv) în 1982 la 60 MWv în 1992.

În prezent, 90% din producția mondială de module se realizează în Japonia, Statele Unite și Europa, în special de mari companii ca Siemens, Sanyo, Kyocera, Solarex și BP Solar, care dețin 50% din piața mondială. Restul de 10% al producției mondiale este realizat în Brazilia, India și China, care sunt principalii producători de module fotoelectrice din țările în curs de dezvoltare.

Sisteme fotoelectrice

Una din utilizările radiației solare o constituie transformarea acesteia în electricitate prin intermediul procesului fotoelectric. Termenul de "foto-pilă" (în sensul pilă electrică) este foarte frecvent utilizat pentru a desemna celula fotovoltaică (FV). Trebuie totuși menționat că, în ciuda termenului folosit, într-o celulă nu se înmagazinează deloc energie, sub nici o formă, nici chimică. Nu este deci o pilă electrică, ci un convertor instantaneu, ce nu poate furniza energie electrică în absența radiației solare. O celulă în întuneric total se comportă ca un element pasiv.

În plus, celula solară nu poate fi asimilată cu nici un alt tip de generator clasic de energie electrică de curent continuu. Aceasta deoarece, celula fotoelectrică nu este nici sursă de tensiune constantă, nici sursă de curent constant. În prezent, randamentul conversiei energiei solare în energie electrică este slab (cel mai adesea, sub 12 %). Aceasta înseamnă că, într-o zonă cu expunere nominală de 1000 W/m², sunt necesari 12 m² de panouri FV pentru a furniza 1 kWv, ceea ce determină un cost ridicat al wattului-vârf.

Acest randament scăzut, ca și costurile destul de mari ale sursei fotoelectrice, au determinat ca utilizatorii să își pună problema exploatarii la maximum a puterii electrice disponibile la nivelul generatorului FV. Acest maxim se obține în general, prin asigurarea unei bune adaptări între generatorul FV și consumatorul asociat. Adaptarea se realizează prin utilizarea convertoarelor statice, care funcționează în regimuri variate.

Există trei tipuri de sisteme fotoelectrice: [sisteme autonome](#), [hibride](#) și [conectate la rețea](#).

Sisteme autonome

Sistemele autonome se bazează doar pe energia solară pentru a asigura necesarul de energie electrică. Așa cum s-a arătat mai înainte, ele pot conține acumulatori, care înmagazinează energia produsă pe timpul zilei, furnizând-o pe durata nopții sau când radiația solară este insuficientă. Acest tip de sistem, poate, de asemenea, să corespundă nevoilor unei aplicații (cum ar fi pomparea apei), fără să se utilizeze acumulatori. Ca regulă generală, sistemele FV autonome se instalează acolo unde reprezintă sursa cea mai economică de energie electrică. Oricând se poate opta, din motive de mediu, sau pentru a asigura un sistem mai fiabil fără conectare la rețea, pentru un sistem hibrid.

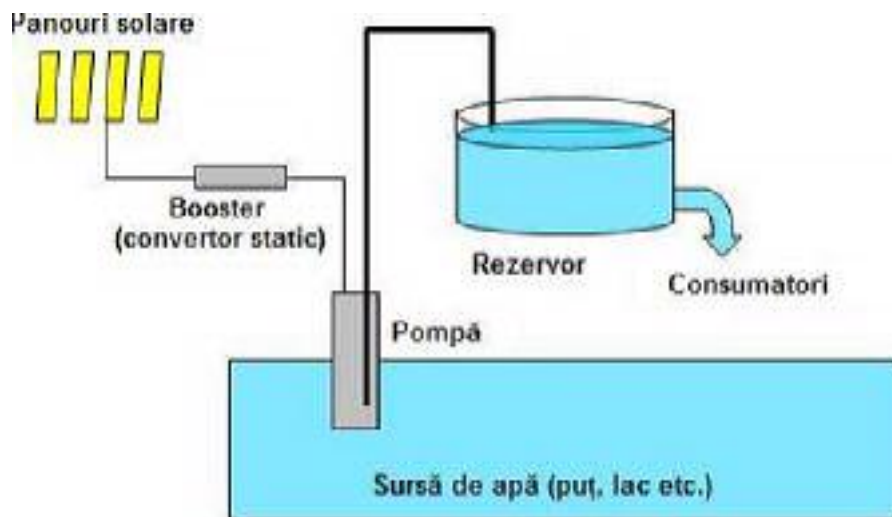
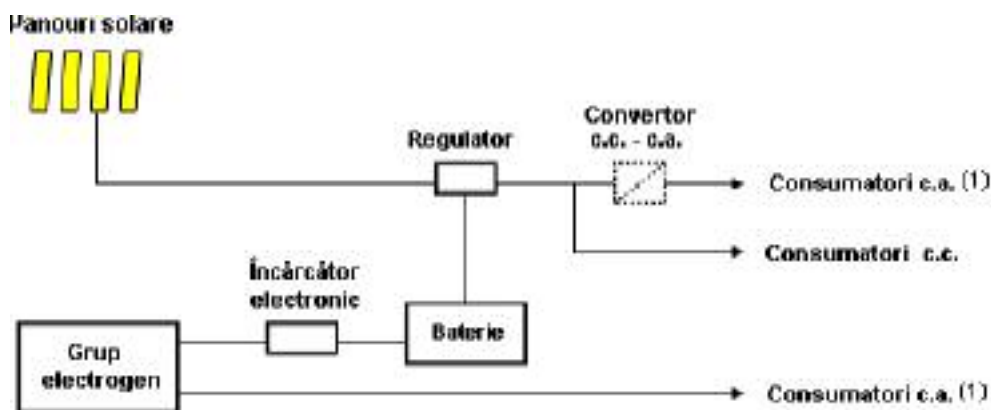


Figura 1: Sistem de pompare fără acumulatori.

Sisteme hibride

Sistemele hibride, care sunt, de asemenea, independente de rețeaua electrică de distribuție, se compun dintr-un generator fotoelectric, asociat cu o eoliană sau grup electrogen cu motor cu ardere internă, sau cu ambele. Un astfel de sistem se dovedește util în cazul aplicațiilor care necesită alimentarea continuă cu putere relativ mare, în cazul în care nu este suficientă lumină pe durata unor perioade ale anului sau pentru reducerea investiției în ceea ce privește modulele fotoelectrice și bateriile de acumulatori.



(1) Gestionarea consumatorilor alimentați direct de la grup sau de la baterie, depinde de tipul consumatorului și de modul dorit de funcționare

Figura 2: Sistem hibrid cu grup electrogen.

Sisteme conectate la rețea

Sistemele de producere a energiei fotoelectrice, conectate la rețea, sunt rezultatul tendinței de descentralizare a rețelelor electrice. Energia este produsă mai aproape de locul unde se consumă și nu numai în termocentrale sau hidrocentrale mari.

În timp, sistemele conectate, vor reduce necesitatea creșterii capacității liniilor de transport și distribuție. Un sistem conectat la rețea asigură necesarul local de energie electrică, iar eventualul

excedent îl debitează în rețea; acest transfer, elimină necesitatea achiziționării și întreținerii bateriilor de acumulare.

Sistemele mai mari presupun un invertor de putere mare ce poate fi conectat la mai multe panouri (ca în cazul sistemelor neconectate la rețea). Curentul continuu este transformat în curent alternativ, sincronizat cu rețeaua. Aceasta se comportă ca o baterie de acumulatori fără limită de capacitate.

Cea mai mare parte a costului unui sistem conectat la rețea o reprezintă fabricația modulelor fotoelectrice din componența acestuia. Aceste costuri au cunoscut reduceri importante pe parcursul ultimilor ani și este de așteptat ca această tendință să continue.

În consecință, acest tip de sistem devine din ce în ce mai abordabil:

- În unele regiuni urbane cu climat cald, costul kWh de electricitate produsă de sistemele fotoelectrice conectate la rețea, este comparabil cu cel produs prin alte metode "clasice".
- În regiunile cu radiație solară redusă, acest tip de sistem este mai puțin interesant.

Există un cert potențial al pieței de sisteme rezidențiale fotoelectrice conectate la rețea, dar trebuie ca prețul lor să mai scadă, pentru a putea deveni competitive economic cu distribuția "clasică" de energie, relativ ieftină și disponibilă.

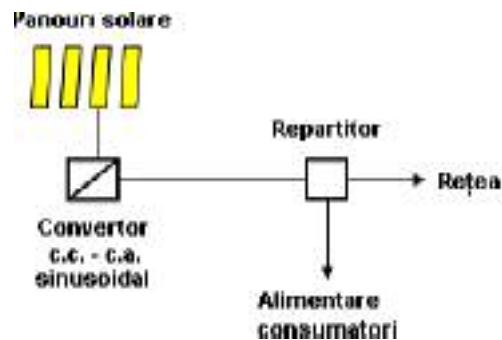


Figura 3: Sistem fotoelectric conectat la rețea.

Componentele unui sistem fotoelectric

Componentele unui sistem fotoelectric depind de aplicație: locuință izolată sau în apropierea rețelei, utilizarea unei baterii sau doar a energiei solare, existența convertoarelor statice de putere.

Un sistem fotoelectric poate cuprinde:

- Celulele solare
- Baterii de acumulare
- Reglatoarele de sarcină
- Convertoare statice
- Alte componente

După cum se poate vedea, celulele solare sunt tratate într-o lecție separată. În continuare se vor detalia puțin celelalte componente.

1. Bateriile de acumulare

În sistemele electrice autonome, stocarea energiei este asigurată, în general, de baterii de acumulare. Acestea sunt esențiale pentru buna funcționare a sistemelor autonome. Elementele de stocare reprezintă 13 - 15% din investiția inițială, pentru o durată de exploatare de douăzeci de ani.

Bateriile de acumulare sunt de tipul [plumb-acid](#).

Baterii cu plumb

În principiu, aceste baterii se compun din doi electrozi de plumb și oxid de plumb, plasați într-un electrolit compus din acid sulfuric diluat.

Există două tipuri de astfel de baterii cu plumb:

- Baterii cu electrolit lichid
- Baterii cu electrolit stabilizat

1. Baterii cu electrolit lichid

Aceste baterii sunt constituite dintr-un recipient în care se alternează plăci pozitive și negative, separate de distanțoare izolante. Recipientul este închis cu un dop, pentru a evita corodarea internă și scurgerea electrolitului.

Avantaj: Construcție simplă, deci ieftine.

Dezavantaj: Bateriile trebuie păstrate și utilizate în poziție orizontală, altfel electrolitul se scurge prin orificiul de egalizare a presiunii din dop, plăcile nemăfiind scufundate în electrolit.

2. Baterii cu electrolit stabilizat

Aceste baterii se mai numesc cu recombinație a gazului. În cazul acestora, electrolitul nu mai este lichid, ci sub formă de gel.

Avantaje: Acest tip de baterii nu necesită întreținere, pe toată durata de viață, asigură etanșeitate totală, deci nu există degajări de gaze.

Dezavantaj: Produsul este mai tehnic (gelul), deci mai scumpe.

Bateriile se utilizează în cazul în care există un decalaj între perioadele când este solicitată energie și perioadele însorite. Alegerea tipului de baterie se face în funcție de puterea medie zilnică și în funcție de timpul necesar de stocare.

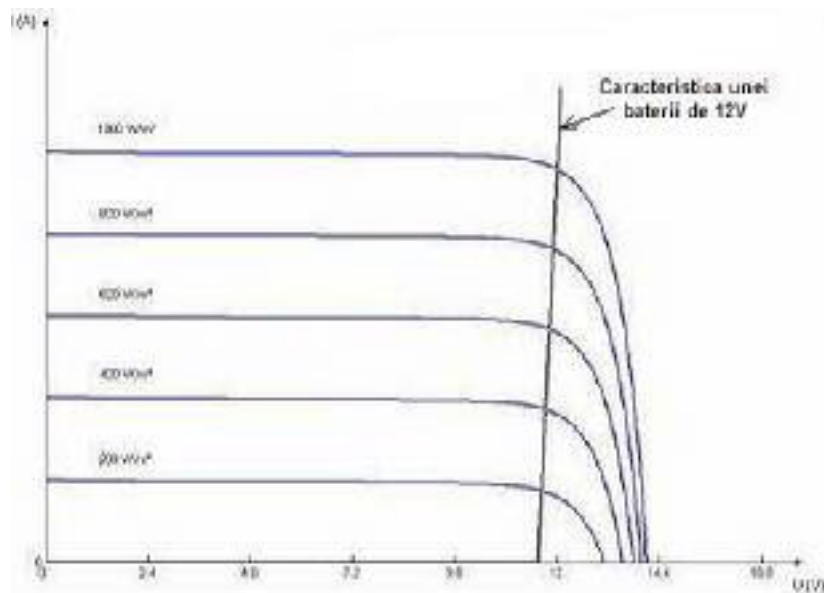


Figura 1: Caracteristicile generatoarelor fotoelectrice și a bateriei.

După cum se vede din figura de mai sus, caracteristica bateriilor se adaptează destul de bine celor ale generatoarelor fotoelectrice, deoarece ele funcționează la tensiune cvasi-constantă. Este suficient să se dimensioneze bateria pentru a plasa punctul de funcționare în punctul de putere maximă, deoarece tensiunea sa U_{pmax} (tensiunea corespunzătoare puterii maxime) se modifică puțin în funcție de iluminare.

2. Reglatoarele de sarcină

În sistemele fotoelectrice se pot utiliza mai multe tipuri de reglatoare. Acestea controlează fluxul de energie, trebuind să protejeze bateria de supraîncărcare (solară) și de descărcare gravă (consumatori). De asemenea, reglatoarele asigură supravegherea și siguranța instalației.

Există trei categorii principale de reglatoare:

- **Reglatoare serie**, care conțin un întreruptor între generatorul fotoelectric și bateria de acumulare, pentru întreruperea încărcării.

Reglatoare serie

Schema de principiu:

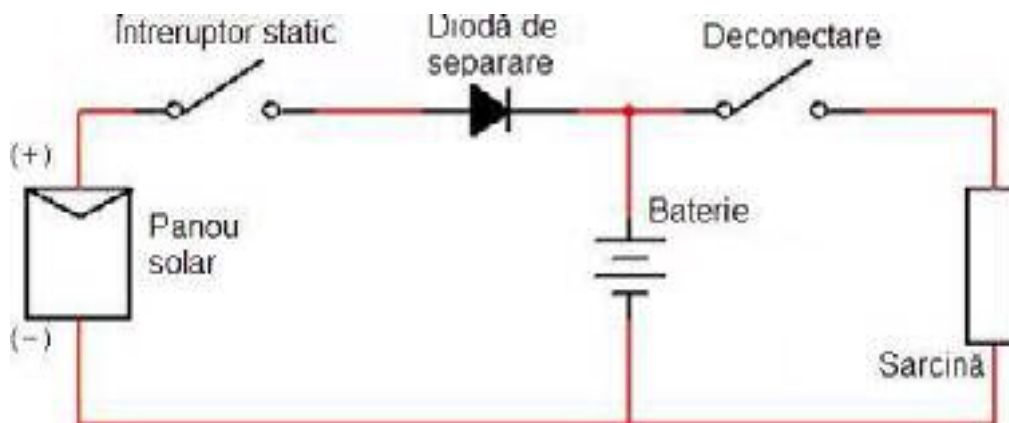


Figura 2: Schema de principiu a regulatorului serie.

Întreruptorul de încărcare este în serie cu bateria. El se deschide când bateria este încărcată.

Avantaj: tensiunea la bornele întreruptorului este mică.

Dezavantaj față de regulatoarele de tip paralel: întreruptorul determină o cădere de tensiune suplimentară între panouri și baterie.

- **Regulatoare paralel**, care scurtcircuitază generatorul fotoelectric la finalul încărcării bateriei de acumulare.

Regulatoare paralel

Schema de principiu:

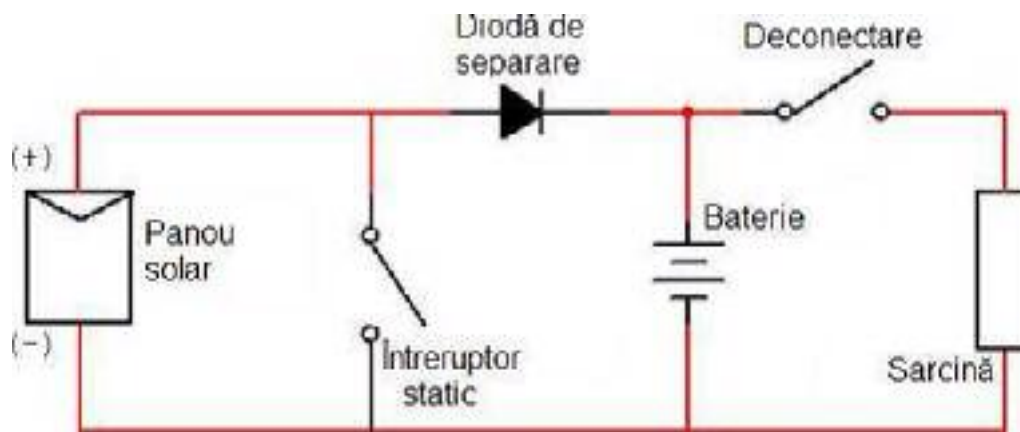


Figura 3: Schema de principiu a regulatorului paralel.

Pe durata încărcării, panourile solare sunt conectate direct la baterii. Când acestea sunt încărcate, panourile sunt scurtcircuitate. Dioda de separare trebuie neapărat să fie prevăzută în schemă, pentru a nu scurtcircuita bateria atunci când întreruptorul este închis. Această diodă asigură și blocarea curentului nocturn, ce ar putea să apară între baterie și panou.

Întreruptorul static: tranzistor MOSFET

Dezavantaje:

- Întreruptorul este solicitat de întreaga tensiune a panoului, putând deci apărea probleme de protecție la supratensiuni.
- Solicitarea termică a întreruptorului poate fi importantă la valori mari ale curentului.
- **Regulatoare ce urmăresc punctul de putere maximă** (MPPT - Maximum Power Point Tracking), care permit extragerea din câmpul de celule, în permanență, a maximumului de putere.

Regulatoare cu căutarea punctului de putere maximă (MPPT)

Principiul MPPT

Regulatoarele MPPT sunt concepute pentru a asigura extragerea puterii maxime din panourile solare. Aceasta permite recuperarea maximumului de energie, indiferent de temperatură și iluminare. În permanență, tensiunea și curentul sunt măsurate, pentru deducerea puterii extrase din panou. Puterea este comparată cu valoarea anterioară a acesteia. În urma comparării, tensiunea la bornele panoului este crescută sau redusă.

Avantaj: Funcționează într-o plajă foarte largă de temperaturi, ceea ce asigură recuperarea excesului de energie pe durata iernii.

Dezavantaj: Investiția devine rentabilă în urma analizei pierderilor induse de regulatorul MPPT și de convertoarele c.c.-c.c.

3. Convertoarele statice

În funcție de aplicație, se utilizează convertoare statice pentru adaptarea puterii generate la necesitățile sarcinii.

În principal, există **convertoare c.c.-c.c.**, care adaptează tensiunea de c.c. furnizată de panourile fotoelectrice la necesitățile sarcinii și qui fournissent à la charge une tension DC différente de la tension générée par les panneaux et les **convertoare c.c.-c.a.**, care transformă energia de c.c. în c.a., pentru alimentarea sarcinilor corespunzătoare.

Convertoare statice c.c. - c.c.

Aceste convertoare, numite și Variatoare de Tensiune Continuă (VTC), transformă o tensiune continuă (a bateriei), tot în tensiune continuă, cu valoare medie diferită, pentru alimentarea sarcinilor de c.c.

Există două tipuri de astfel de VTC: **ridicător** și **coborâtor**.

- VTC ridicător

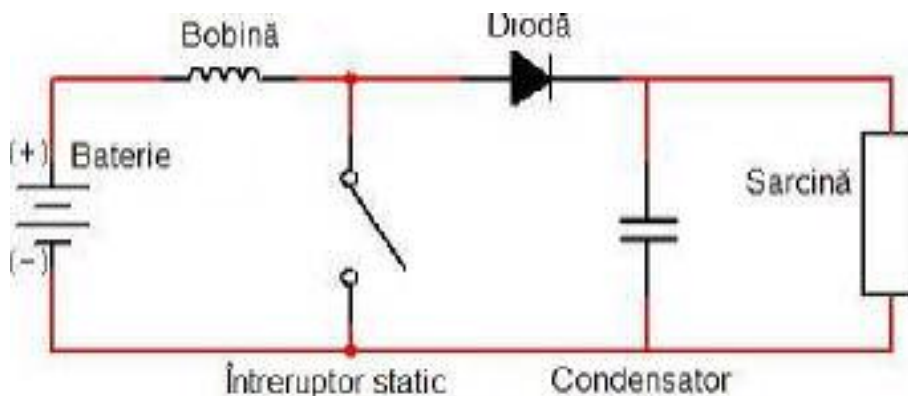


Figura 4: Schema de principiu a unui VTC ridicător.

Pe intervalele când întreruptorul este închis, în bobină se înmagazinează energie de la baterie. La deschiderea întreruptorului, tensiunea de autoinducție a bobinei, împreună cu sursa, determină apariția unei supratensiuni, ce este transferată condensatorului și sarcinii. Dioda (numită "de separare") împiedică descărcarea condensatorului pe intervalele când întreruptorul este închis. Condensatorul filtrează tensiunea continuă la ieșire, reducându-i pulsațiile.

Randamentul unor astfel de convertoare este de 70%, putând atinge 85 - 90% pentru cele mai performante.

- VTC coborâtor

Tensiunea la ieșire este mai mică decât a bateriei, fiind utilizate pentru alimentarea sarcinilor cu tensiune mai mică decât a bateriei (aparate radio).

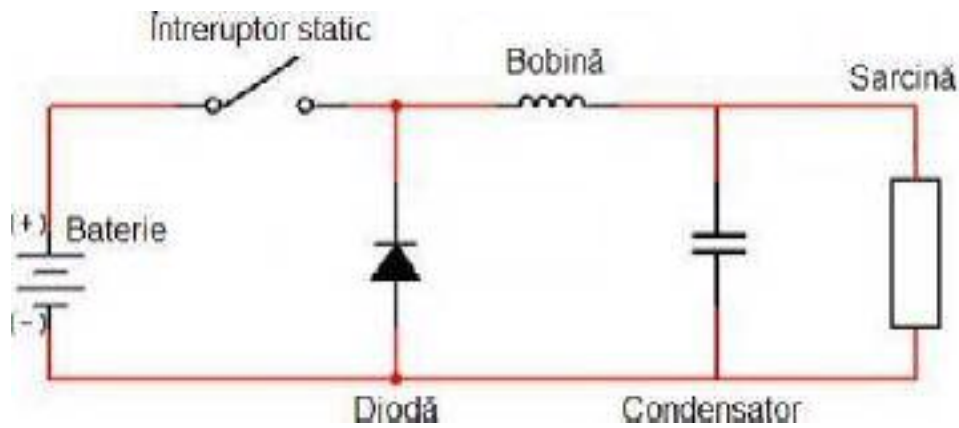


Figura 5: Schema de principiu a unui VTC coborător.

Pe intervalele când întreruptorul este închis, bateria debitează curent sarcinii, ce parcurge bobina. Când întreruptorul este deschis, energia înmagazinată în bobină, asigură menținerea nenulă a curentului, ce se va închide pe aceste intervale, prin diodă (numită "de nul"). Randamentul acestor convertoare este de 80 - 90%.

Convertoare statice c.c. - c.a.

Aceste convertoare se numesc **invertoare**. Ele pot fi utilizate atât pentru alimentarea sarcinilor izolate, cât și conectarea generatoarelor fotoelectrice la rețea. Deformațiile formei de undă datorate comutațiilor, poate produce perturbații în funcționarea celulelor fotoelectrice. Normele de construcția a panourilor fotoelectrice integrează standardele IEEE.

Invertoarele pot genera formă de undă sinusoidală (mai rar), formă de undă dreptunghiulară (**undă plină**) sau așa-zis, **pseudosinusoidală**. Alegerea tipului de inverter depinde de echipamentele ce trebuie alimentate.

4. Alte componente

În această categorie intră elementele conexe, dar care sunt indispensabile bunei funcționării sistemelor fotoelectrice: protecțiile contra descărcărilor atmosferice, disjunctoare și siguranțe fuzibile.

deoarece panourile solare sunt echipamente scumpe, ele trebuie protejate pentru a evita deteriorarea lor. Pericolele sunt multiple:

- Perturbații induse de comutațiile elementelor din componența convertoarelor statice de putere. Se pot utiliza filtre pentru eliminarea armonicilor.
- Funcționarea sarcinii: panourile se deteriorează repede dacă absorb putere electrică. Se poate utiliza diode care să împiedice circulația curentului în sensul nedorit.
- Descărcări atmosferice

Efectul fotoelectric

Efectul fotoelectric, respectiv transformarea energiei solare ("foton") în energie electrică ("volt") a fost descoperit în 1839 de fizicianul A. Becquerel.

Acest efect se bazează pe trei fenomene fizice simultane, strâns legate între ele:

- Absorbția luminii de către materiale

- Transferul de energie de la fotoni la sarcinile electrice
- Colectarea sarcinilor

1. Absorbția luminii

Fotonii compun lumina. Aceștia pot penetra anumite materiale, sau chiar să le traverseze. În general, o rază de lumină care atinge suprafața unui mediu, poate suporta trei fenomene optice:

- *Reflexia*: lumina este "întoarsă" de către suprafață;
- *Transmisia*: lumina traversează obiectul;
- *Absorbția*: lumina penetrează obiectul și nu îl mai părăsește, energia fiind restituită într-o altă formă.

Energia unui foton este dată de:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

în care:

h - constanta lui Planck ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s);

ν - frecvența [Hz];

c - viteza luminii ($3 \cdot 10^8$ m/s);

λ - lungimea de undă [m].

Într-un material fotoelectric, o parte a energiei fluxului luminos va fi restituită sub formă de energie electrică. Trebuie deci ca materialul să aibă capacitatea de a absorbi lumina vizibilă, aceasta fiind ceea ce se dorește a se converti: lumina solară sau a altor surse artificiale.

2. Transferul de energie de la fotoni la sarcinile electrice

Cum se transformă energia luminoasă în electricitate?

Sarcinile elementare ce vor determina apariția unui curent electric în urma iluminării, sunt electronii (sarcini negative elementare, conținute de materialele semiconductoare).

Fotonii vor ceda energia lor, electronilor periferici, ceea ce le va permite să se elibereze de atracția exercitată de nucleu. Acești electroni eliberați vor putea forma un curent electric, dacă sunt extrași din material.

3. Colectarea sarcinilor

Pentru ca sarcinile eliberate prin iluminare să genereze energie, trebuie ca acestea să circule. Trebuie deci extrase din materialul semiconductor și creat un circuit electric.

Această extracție a sarcinilor se realizează prin intermediul unei joncțiuni create special în semiconductor. Scopul este de a crea un câmp electric în interiorul materialului, care va antrena sarcinile negative într-un sens, iar pe cele pozitive în celălalt sens. Aceasta se realizează prin **doparea semiconductorului**. Joncțiunea unei fotocelule cu siliciu este constituită dintr-o parte dopată cu fosfor (P), numită de tip "n", alipită unei părți dopate cu bor (B), numită de tip "p". La frontiera celor două părți se crează câmpul electric care separă sarcinile pozitive și cele negative (Figura 6).



Figura 6: Crearea câmpului electric într-o joncțiune p-n

Doparea semiconductoarelor

Doparea unui material semiconductor reprezintă introducerea în structura materialului a unor sarcini excedentare, pentru se ameliora conductivitatea materialului.

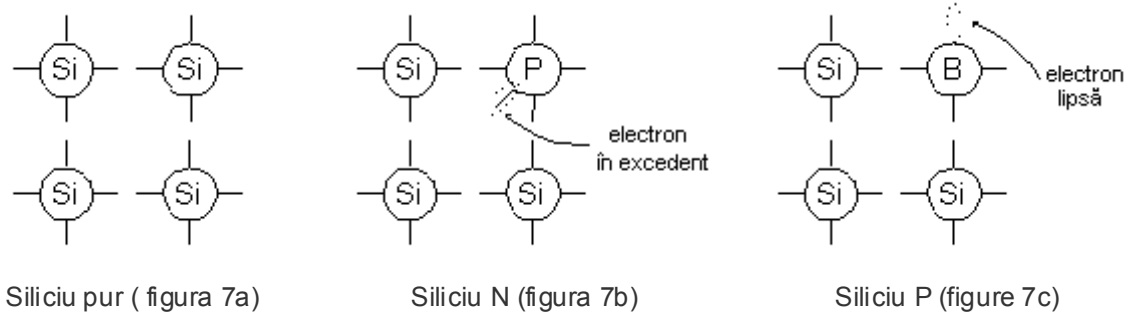


Figura 7: Reprezentarea schematică plană a atomilor de siliciu (4 electroni pe stratul exterior).

În stare pură, numită "intrinsecă", siliciul nu este fotoconductor (Figura 7a).

Fiind dopat cu fosfor (5 electroni pe stratul exterior), va apare un excedent de sarcini negative. Materialul va fi potențial "donor" de electroni, disponibili pentru conducția electrică. Acest tip de material este siliciul de tip "n" (Figura 7b).

Se poate dopa siliciul cu bor (3 electroni pe stratul exterior), apărând un excedent de "goluri", respectiv de sarcini pozitive. Materialul va fi potențial "acceptor" de electroni. Acest tip de material este siliciul de tip "p" (Figura 7c).