

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ
„GHEORGHE ASACHI” din IAȘI**



Ing. Robert Jahrstorfer

REZUMAT AL TEZEI DE DOCTORAT

**Studii privind tehnici de detectare și reducere a degradării
induse de potențial în sistemele fotovoltaice**

Domeniul: Inginerie electrică

Conducător de doctorat: **Prof. univ. dr. ing. Alexandru SĂLCEANU**

IAȘI, 2026

CUPRINS

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE

- 1.1 Contextul care a motivat cercetarea mea doctorală
- 1.2 Fotovoltaic versus combustibili fosili
- 1.3 Cauzele degradării induse de potențial
- 1.4 Apariția și recunoașterea fenomenului PID
- 1.5 Proceduri de testare și certificare
- 1.6 Metode de investigare și tehnici de măsurare
- 1.7 Pierderi de randament și consecințe juridice
- 1.8 Experiență de exploatare, degradare și reciclare

CAPITOLUL 2. ABORDĂRI PENTRU IDENTIFICAREA ȘI MĂSURAREA PID

- 2.1 Tipuri de sisteme fotovoltaice
- 2.2 Tipuri de module și tehnologii de celule
- 2.3 Invertoare cu și fără transformator
- 2.4 Obiective, metodologie și montaje experimentale
- 2.5 Dezvoltarea contramăsurilor și analiza curentului de scurgere

CAPITOLUL 3. METODE DE REDUCERE A EFECTELOR PID

- 3.1 Contramăsuri reversibile
- 3.2 Timpul de regenerare
- 3.3 Limitele contramăsurilor
- 3.4 Considerații economice

CAPITOLUL 4. PLAN DE MONITORIZARE ȘI MENTENANȚĂ

- 4.1 Scop și filosofie generală
- 4.2 Monitorizare zilnică, săptămânală și lunară
- 4.3 Campanii trimestriale, semestriale și anuale
- 4.4 Intervenții specifice PID, piese de schimb și indicatori

CAPITOLUL 5. ABORDĂRI ACTUALE ȘI VIITOARE

- 5.1 Perspectiva mea
- 5.2 Tensiuni înalte, materiale, mediu și invertoare
- 5.3 Împământare, PID-box-uri și avertizare timpurie

CAPITOLUL 6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE

- 6.1 Concluzii principale
- 6.2 Contribuții originale
- 6.3 Direcții de cercetare viitoare

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE

1.1 Contextul care a motivat cercetarea mea doctorală

Cercetarea mea doctorală pornește de la o realitate tehnică și economică extrem de actuală: tranziția energetică depinde în mare măsură de capacitatea sistemelor fotovoltaice de a produce energie electrică în mod fiabil, pe durate lungi de timp. În ultimii ani, fotovoltaicul a trecut din zona tehnologiilor alternative într-o zonă centrală a producției de energie, fiind utilizat atât pe acoperișuri de locuințe, cât și pe clădiri comerciale sau în parcuri solare de ordinul sutelor de kilowați și al megawaților. Această evoluție aduce în prim-plan nu doar randamentul inițial al modulelor, ci și degradarea lor în timp.

Teza mea își are originea în experiența mea profesională directă, ca inginer cu peste trei decenii de activitate în proiectarea, instalarea, exploatarea și expertizarea sistemelor fotovoltaice. Spre deosebire de o abordare exclusiv teoretică, am valorificat accesul la instalații reale, la module provenite de la producători diferiți, la echipamente de măsurare și la cazuri concrete de defectare. Această poziționare mi-a permis observarea degradărilor nu ca fenomene izolate, ci ca efecte care apar în timp, sub influența tensiunii de sistem, a mediului, a montajului și a mentenanței.

Un rol important în definirea temei l-a avut experiența mea cu propria mea centrală fotovoltaică la sol din zona Eichendorf, Bavaria, cu puterea instalată de aproximativ 509 kWp. În această centrală, am identificat efectul PID după o perioadă de funcționare, prin scăderi treptate de producție și prin investigații de electroluminescență. Acest caz mi-a arătat că o instalație monitorizată zilnic poate ascunde, totuși, o degradare progresivă, deoarece pierderile se confundă ușor cu variațiile meteorologice normale.

Degradarea indusă de potențial, cunoscută sub acronimul PID, este deosebit de periculoasă tocmai prin caracterul său lent și greu vizibil. În multe situații, operatorul observă doar o scădere de randament, fără urme evidente pe suprafața modulului. Când fenomenul este diagnosticat târziu, pierderile pot deveni importante, iar posibilitatea de regenerare poate fi limitată. De aceea, scopul general al tezei este de a lega înțelegerea teoretică a mecanismului PID de tehnici practice de detecție, prevenire și reducere.

1.2 Fotovoltaic versus combustibili fosili

Situez problema PID în contextul mai larg al competiției dintre energiile regenerabile și combustibilii fosili. Prezint fotovoltaicul ca una dintre tehnologiile capabile să reducă dependența de sursele convenționale, însă această promisiune se poate împlini numai dacă modulele își păstrează performanțele pe durata de viață proiectată. Reducerea costurilor modulelor, creșterea capacităților instalate și apariția unor concepte noi, precum sistemele flotante, modulele bifaciale sau integrarea în clădiri, nu elimină necesitatea unei exploatare corecte.

Dacă un modul fotovoltaic este tratat doar ca produs achiziționat și instalat, riscul este de a subestima interacțiunea dintre materialele modulului, inverter, legarea la pământ, umiditate, temperatură și regimul de funcționare. Tocmai această interacțiune face ca PID să fie relevant pentru întreaga industrie fotovoltaică. Într-o piață în care costul energiei solare scade, pierderile de producție provocate de degradări ascunse pot anula o parte din avantajele economice estimate la începutul investiției.

Subliniez că dezvoltarea fotovoltaicului nu trebuie privită numai prin prisma capacității instalate, ci și prin prisma calității proiectării și a mentenanței. Înlocuirea combustibililor fosili cu surse regenerabile presupune sisteme care funcționează predictibil și care pot fi diagnosticate. În acest sens, PID devine un test al maturității domeniului: o industrie matură nu se limitează la instalarea rapidă, ci creează proceduri de verificare, instrumente de intervenție și recomandări accesibile pentru operatorii mici și mijlocii.

1.3 Cauzele degradării induse de potențial

PID apare atunci când, în interiorul și la suprafața modului fotovoltaic, diferențele de potențial față de pământ favorizează curenți de scurgere și migrarea purtătorilor de sarcină. În modulele cristaline cu ramă metalică și sticlă, câmpul electric dintre celulele active și cadrul legat la pământ poate determina deplasarea ionilor, în special în condiții de umiditate și temperatură ridicată. Materialele precum sticla, stratul antireflex, EVA-ul și zona de încapsulare nu sunt simple elemente pasive, ci participă la comportamentul electric al ansamblului.

Mecanismul poate fi descris prin scăderea rezistenței de izolație și prin apariția unei căi de scurgere între circuitul activ al modului și elementele împământate. Cu cât rezistența pe această cale este mai mică, cu atât curentul de scurgere este mai mare, iar probabilitatea deteriorării performanței crește. În teza mea, corelez această idee cu observația că PID este mai pronunțat către capătul negativ al stringului, acolo unde polarizarea față de pământ poate susține acumularea de sarcini și reducerea rezistenței de șunt.

O consecință electrică importantă este transformarea parțială a celulelor afectate din fotodiode eficiente în elemente care se comportă mai apropiat de rezistențe parazite. Acest lucru modifică forma caracteristicii I-V, reduce curentul disponibil și scade puterea maximă livrată. În practică, fenomenul poate produce pierderi de producție de ordinul zecilor de procente, iar în cazurile severe poate conduce la eșec economic al sistemului.

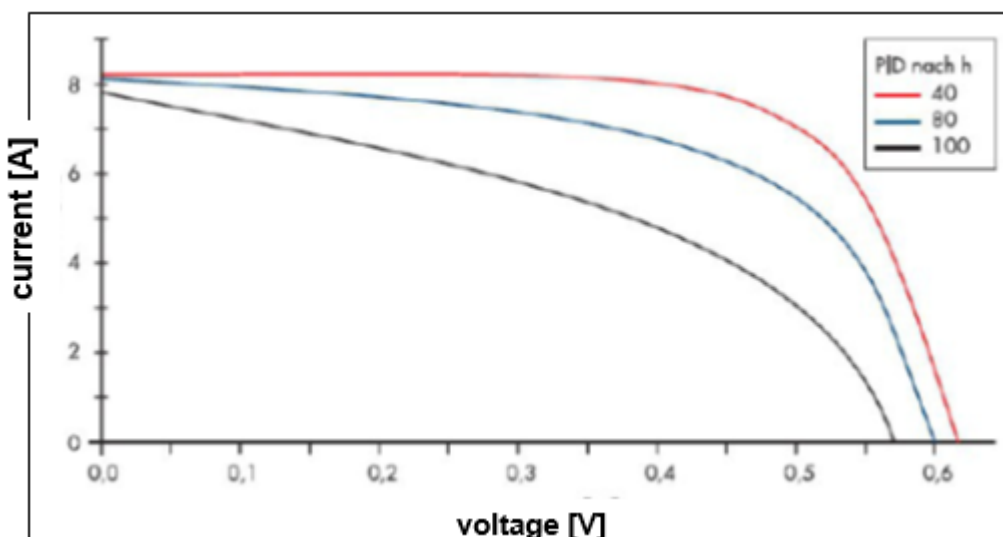


Fig 0.1 I(U)-Curbă caracteristică a unui modul fotovoltaic cu evoluție în timp atunci când este expus la condiții favorabile pentru PID.

1.4 Apariția și recunoașterea fenomenului PID

Fenomenul PID a fost discutat științific începând cu anii 2000, însă impactul său asupra sistemelor comerciale a devenit evident mai târziu, pe măsură ce instalațiile au acumulat ani de funcționare și tensiunile de sistem au crescut. Arăt că un motiv al recunoașterii târzii este tocmai absența unor simptome vizibile. Modulul poate arăta normal, iar scăderea producției poate fi atribuită murdăririi, îmbătrânirii naturale, umbririi sau variațiilor climatice.

O altă cauză a întârzierii diagnosticului este faptul că PID nu se manifestă identic la toate tehnologiile. Structura celulei, tipul de încapsulare, rama, sticla, folia posterioară, invertorul și schema de împământare influențează susceptibilitatea. Prin urmare, nu este suficientă o regulă generală; este necesar un set de metode complementare, aplicate în funcție de tipul sistemului și de simptomele observate.

1.5 Proceduri de testare și certificare

Acord atenție standardelor IEC/TS 62804, care definesc proceduri de evaluare a rezistenței modulelor fotovoltaice la degradări induse de tensiunea de sistem. Pentru modulele cristaline, testele descriu condiții de stres accelerat, utile pentru compararea susceptibilității, însă subliniez că aceste proceduri nu reproduc integral mediul natural. În exploatare, modulul este expus simultan la radiație solară, cicluri de temperatură, umiditate, murdărire, îmbătrânire mecanică și condiții variabile de sol.

De aici rezultă o concluzie metodologică importantă: certificarea este necesară, dar nu suficientă. Un modul certificat poate avea comportamente diferite în funcție de configurația instalației. De aceea, insist asupra măsurărilor în teren și a monitorizării pe termen lung. Standardele oferă cadrul de referință, în timp ce experiența de exploatare indică modul în care riscul se materializează în instalații reale.

1.6 Metode de investigare și tehnici de măsurare

1.6.1 Măsurarea caracteristicii I-V

Măsurarea caracteristicii curent-tensiune este o metodă de bază pentru evaluarea performanței unui modul, a unui string sau a unui generator fotovoltaic. Prin trasarea curbei I-V și a curbei P-V se identifică punctul de putere maximă, se compară valorile cu datele producătorului și se observă abateri de curent, tensiune sau factor de umplere. În contextul PID, metoda este utilă deoarece degradarea se reflectă prin scăderea curentului și prin modificarea formei curbei.

Totuși, măsurarea I-V în teren este influențată de iradianță, temperatură, condițiile de conectare și stabilitatea meteorologică. Standard Test Conditions nu pot fi reproduse perfect în exterior, motiv pentru care datele trebuie corectate și interpretate cu prudență. Folosesc această metodă ca instrument de confirmare cantitativă, nu ca diagnostic singular.

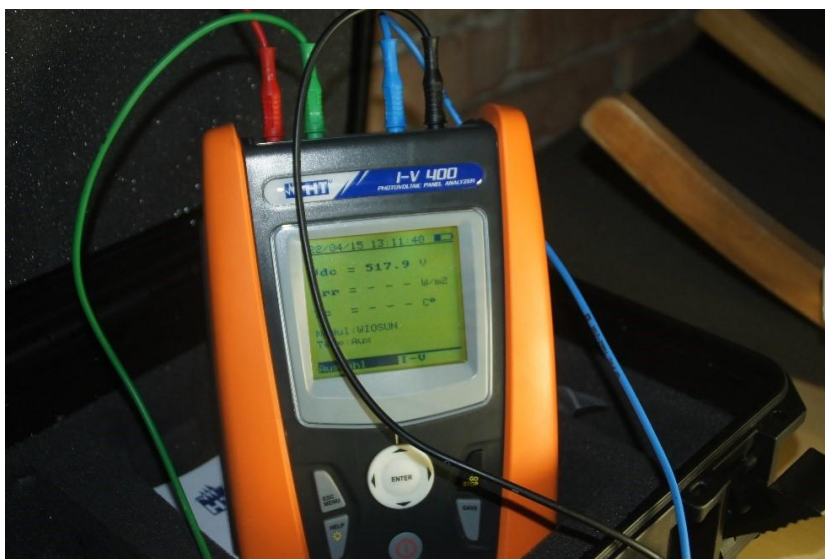


Fig 0.2 Aparat de măsurare pentru caracteristicile I-V, HT I-V400.

1.6.2 Termografia

Prezint termografia ca metodă rapidă, relativ accesibilă și adecvată pentru inspecția instalațiilor mari. Camerele în infraroșu permit identificarea zonelor cu temperatură anormală: celule fierbinți, diode defecte, substrings căzute, contacte slabe, cabluri încălzite sau module cu defecte interne. Avantajul principal este că sistemul poate rămâne în funcțiune, iar inspecția poate acoperi suprafețe mari, inclusiv cu dronă.

În cazul PID, termografia poate semnala efecte secundare, dar nu este întotdeauna suficientă pentru confirmare. O zonă caldă poate avea mai multe cauze, iar o degradare PID incipientă poate să nu producă semnătură termică clară. Prin urmare, recomand corelarea imaginilor termografice cu electroluminescența și cu măsurările electrice.

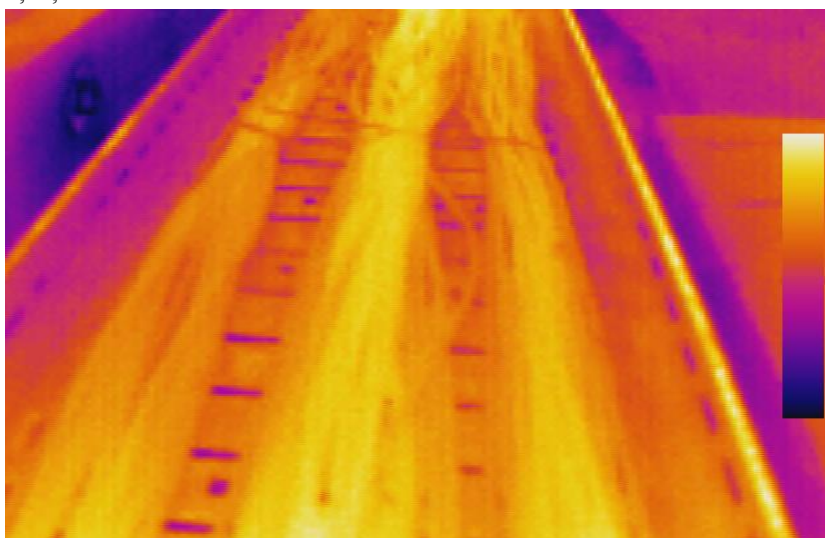


Fig 0.3 Termografie pentru un cablaj de curent continuu într-un traseu de cablu.

1.6.3 Fluorescența UV

Fluorescența UV este inclusă printre metodele de investigare deoarece poate evidenția procese de îmbătrânire a materialelor, fisuri, zone afectate de umiditate sau degradări ale encapsulantului. Metoda aduce informații despre istoria de stres a modulului și despre zonele în care materialele au suferit modificări. Ea nu este prima alegere pentru diagnosticarea directă a PID, dar poate contribui la analiza cauzelor și la diferențierea defectelor.

Într-o strategie completă de mentenanță, investigația UV poate fi utilizată periodic sau selectiv, mai ales în situații litigioase, unde documentarea defectului are importanță juridică. Subliniez că probarea unei degradări nu se reduce la un singur indicator, ci presupune construirea unui dosar tehnic convingător.

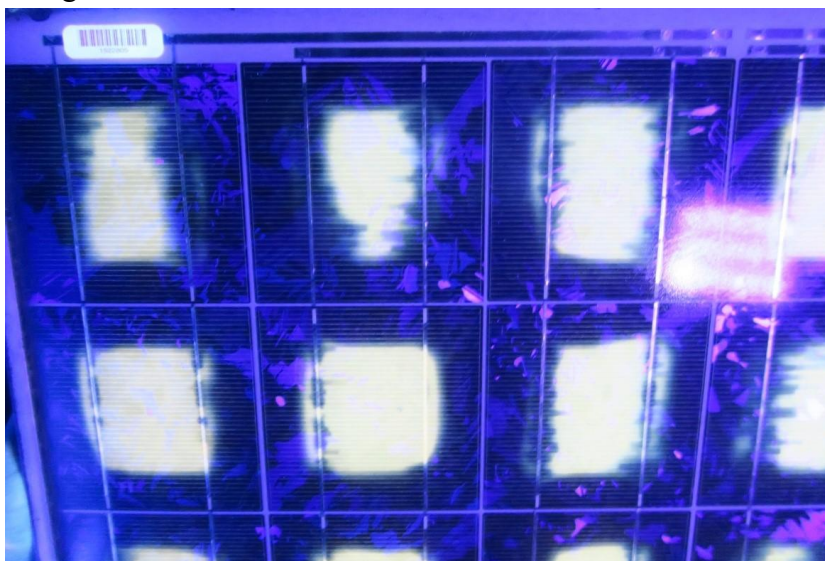


Fig 0.4 Fluorescență UV pe celule solare. Modulul se află deja pe acoperiș de 13 ani și prezintă o fluorescență UV destul de puternică.

1.6.4 Electroluminescența

Electroluminescența este metoda centrală pentru identificarea vizuală a PID. Prin alimentarea modulelor în polarizare directă, celulele emit radiație în infraroșu apropiat, vizibilă cu o cameră adecvată. Celulele sau zonele degradate apar mai întunecate, iar distribuția acestor zone permite evaluarea extinderii defectului. Pentru mine, EL a fost metoda care a făcut posibilă localizarea efectului în propria mea instalație.

Limitarea majoră a metodei este necesitatea efectuării inspecției în întuneric, de obicei noaptea, precum și cerința de echipamente și experiență în interpretarea imaginilor. Condițiile atmosferice, rezoluția camerei, modul de alimentare și accesul la stringuri influențează calitatea rezultatului. Totuși, pentru PID, electroluminescența rămâne cea mai expresivă metodă de demonstrare a fenomenului.

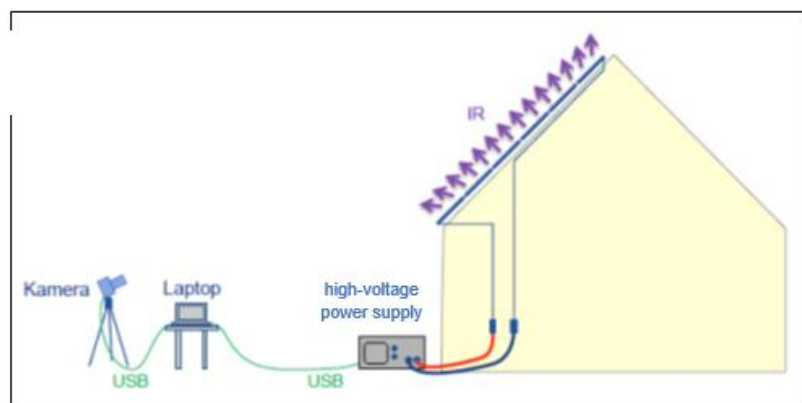


Fig 0.5 Configurația de bază a determinărilor pentru un test de electroluminescență.

1.6.5 Caracteristici întunecate și verificarea diodelor de bypass

Măsurările în întuneric și verificarea diodelor de bypass completează tabloul diagnostic. Ele permit investigarea unor defecte care nu depind direct de iradianță și pot evidenția rezistențe parazite, contacte slabe, diode defecte sau alte anomalii. În cazul PID, scăderea rezistenței de șunt este un element important, iar măsurarea rezistențelor și a curenților de scurgere oferă o cale de interpretare fizică.

Prin combinarea acestor metode, propun o logică practică: monitorizarea datelor de producție indică o suspiciune, termografia și I-V oferă confirmări operaționale, EL arată distribuția defectului, iar măsurările de rezistență și curent de scurgere clarifică mecanismul electric.

1.7 Pierderi de randament și consecințe juridice

PID produce pierderi de randament care pot începe discret, dar pot deveni semnificative. În cazul analizat, menționez pierderi observabile de ordinul 4-8% într-un interval de aproximativ nouă luni, iar experiența mea acumulată arată că, în situații severe, pierderile pot ajunge mult mai sus. Pentru operatorul unei centrale, diferența dintre producția estimată și producția reală înseamnă venit nerealizat, dificultăți în amortizarea investiției și eventuale litigii cu producătorii sau instalatorii.

Aspectul juridic este important deoarece, în cazul unei reclamații, producătorul modulelor solicită de regulă dovezi tehnice: imagini, rapoarte de măsurare, comparații de randament și documente care să arate extinderea degradării. Fără o documentare riguroasă, pretențiile de garanție pot fi respinse. Din acest motiv, privesc diagnosticul nu doar ca instrument de mentenanță, ci și ca suport probatoriu.

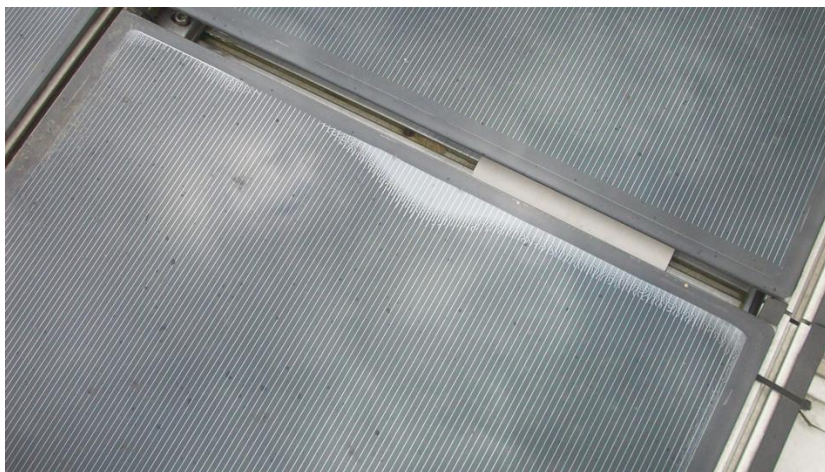


Fig 0.6 Oxid condensat transparent (TCO)

1.8 Experiență de exploatare, degradare și reciclare

Exploatarea sistemelor fotovoltaice implică mai multe tipuri de degradare: îmbătrânire normală, fisuri celulare, delaminare, pătrunderea umidității, defectarea diodelor, degradarea foliei posterioare, defecte de conexiune și efecte legate de sarcină mecanică. PID se adaugă acestei liste ca fenomen electric complex, uneori reversibil, alteori doar parțial reversibil. Înțelegerea sa cere separarea de alte defecte care pot produce simptome similare.

Durata de viață a unui sistem fotovoltaic depinde de calitatea componentelor, de proiectare, de execuție și de mentenanță. Insist asupra faptului că o centrală nu trebuie abandonată după punerea în funcțiune. Ea trebuie urmărită prin indicatori, inspecții și campanii de diagnostic. În plus, pe măsură ce primele generații de module se apropie de finalul duratei de exploatare, reciclarea și gestionarea componentelor defecte devin părți ale responsabilității tehnice și economice.

CAPITOLUL 2. PRINCIPALELE ABORDĂRI ÎN IDENTIFICAREA ȘI MĂSURAREA PID

2.1 Tipuri de sisteme fotovoltaice

În capitolul al doilea am mutat accentul de la contextul general la investigarea concretă a PID. Disting între sisteme rezidențiale, comerciale și centrale la sol, deoarece fiecare categorie are condiții diferite de montaj, tensiune, împământare și acces pentru mentenanță. Centralele la sol, în special cele cu structuri metalice extinse și conectare bună la pământ, pot crea condiții favorabile pentru curenți de scurgere.

În instalațiile de mici dimensiuni, detectarea PID poate fi întârziată de lipsa unei monitorizări detaliate. În centralele medii și mari, monitorizarea există adesea, dar volumul de date și variațiile meteo pot masca degradarea. Din acest motiv, consider necesară o abordare stratificată: date zilnice de producție, comparații între stringuri, inspecții vizuale, campanii electrice și metode imagistice.



Fig 0.1 Sistem mic de acoperiș cu module Si-cristalin



Fig 0.2 Sistem exterior cu module Si-cristalin

2.2 Tipuri de module și tehnologii de celule în legătură cu PID

Susceptibilitatea la PID este legată de tehnologia celulei și de construcția modulului. Modulele policristaline și monocristaline cu celule de tip p au fost frecvent discutate în literatură, însă fenomenul poate avea manifestări diferite în funcție de structura antireflex, encapsulant, sticlă, ramă și distanțele interne. Nu tratez modulul ca obiect omogen, ci ca ansamblu de materiale și interfețe prin care se pot stabili căi de conducție parazită.

Un aspect valoros este analiza comparativă a modulelor de generații diferite, disponibilă datorită activității mele profesionale. Această comparație permite observarea faptului că nu toate

modulele reacționează la fel la același regim de stres. Unele prezintă semne rapide de degradare, altele sunt mai rezistente, iar această diferență poate proveni din calitatea encapsulării, compoziția sticlei sau proiectarea celulei.

Prin urmare, alegerea modulelor pentru o centrală nu trebuie să se bazeze exclusiv pe puterea nominală și preț. Rezistența la PID, istoricul producătorului, rapoartele de testare și compatibilitatea cu schema electrică a instalației trebuie evaluate înainte de achiziție. Această idee este importantă pentru firmele mici și mijlocii care nu își permit pierderi majore sau litigii costisitoare.

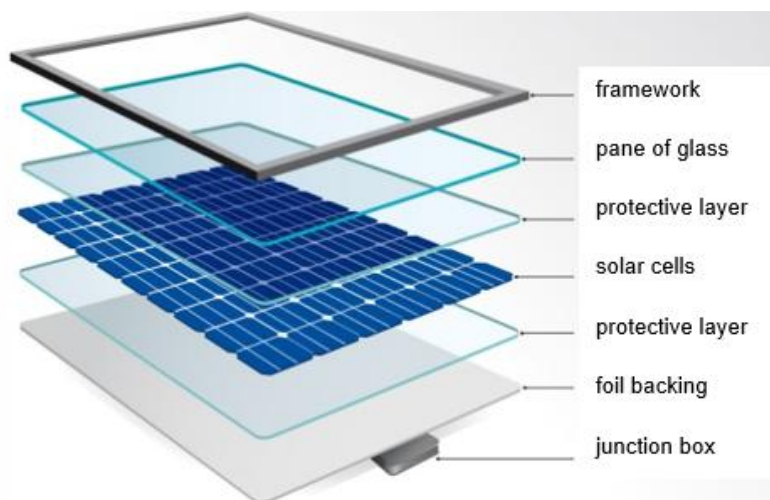


Fig 0.3 Structura schematică a unui modul având folie de sticlă cristalină cu ramă

2.3 Invertoare cu și fără transformator în legătură cu PID

Invertorul influențează direct potențialul generatorului fotovoltaic față de pământ. Sistemele cu transformator pot oferi separare galvanică și pot permite anumite scheme de împământare, în timp ce invertoarele fără transformator sunt mai ușoare, mai eficiente și mai răspândite, dar pot conduce la regimuri de potențial care favorizează PID în anumite configurații. Discut această diferență ca element de proiectare, nu ca simplă caracteristică de catalog.

În practică, riscul PID depinde de tensiunea stringului, de polaritatea față de pământ, de legarea ramei și structurii, de rezistența de izolație și de comportamentul invertorului în timpul zilei și al nopții. O recomandare implicită a lucrării este ca alegerea invertorului să fie făcută împreună cu analiza modulelor și a contramăsurilor posibile. Un inverter performant energetic poate genera probleme dacă interacțiunea cu modulele și împământarea nu este înțeleasă.

2.4 Obiectiv și metodologie

Obiectivul metodologic al tezei este de a identifica relațiile dintre condițiile de stres electric, parametrii de mediu și manifestarea PID, apoi de a transforma aceste relații în recomandări practice. Cercetarea combină studiul literaturii, experiența de teren, încercările în atelier, montajele experimentale cu tensiuni de stres și analiza performanței prin metode imagistice și electrice.

Acord o importanță specială caracterului accesibil al montajelor experimentale. Nu toate firmele de instalare au laboratoare avansate, însă multe pot utiliza surse de tensiune controlată, instrumente pentru curent de scurgere, camere termografice, dispozitive pentru I-V și, eventual,

servicii de electroluminescență. Urmăresc să arăt ce informații relevante pot fi obținute cu mijloace realiste pentru practicieni.



Figure 0.4 Configurația de inspecție pe un sistem de aprox. 3 MWp, pe două rânduri de module

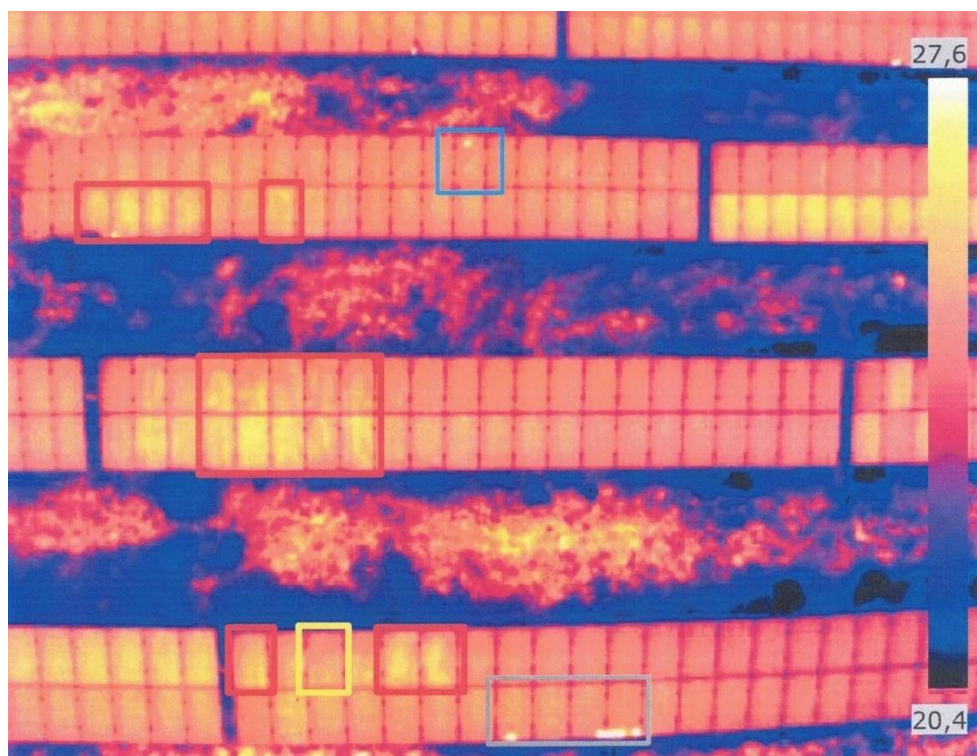


Fig 0.5 Imagine aeriană furnizată prin inspecții termografice

2.4.1 Metode de cercetare și utilizarea aparatelor de măsurare

În cercetare au fost utilizate aparate pentru trasarea caracteristicilor I-V, camere termografice, echipamente de electroluminescență, surse de tensiune continuă, dispozitive de monitorizare a mediului și instrumente de măsurare a curenților sau rezistențelor. Fiecare instrument răspunde la o întrebare diferită: câtă putere se pierde, unde apare defectul, ce temperatură are zona afectată, ce curent se scurge și cum variază acesta cu mediul.

Metoda de lucru nu este una liniară, ci iterativă. Datele de producție generează ipoteze; măsurările electrice confirmă sau resping ipotezele; imaginile EL arată distribuția defectului;

modificarea condițiilor de umiditate, temperatură sau iradianță indică sensibilitatea mecanismului. Astfel, cercetarea se apropie de practica expertizei tehnice, unde concluzia trebuie să fie susținută de mai multe tipuri de dovezi.

2.4.2 Investigarea și prevenția orientate spre obiectiv

Investigarea PID nu trebuie făcută aleatoriu. Propun o orientare spre obiectiv: stabilirea suspiciunii, delimitarea zonei afectate, măsurarea severității, evaluarea reversibilității și alegerea contramăsurii. Această succesiune permite evitarea intervențiilor costisitoare sau inutile. De exemplu, simpla instalare a unui PID-box fără diagnostic poate ascunde alte probleme sau poate fi insuficientă dacă degradarea este avansată.

Prevenția este tratată ca parte a proiectării și a mentenanței. Ea include alegerea modulelor, compatibilitatea inverterului, controlul împământării, verificarea cablurilor, inspecția periodică și reacția rapidă la scăderea performanței. Prevenția nu elimină complet riscul, dar reduce probabilitatea ca PID să ajungă într-un stadiu avansat.

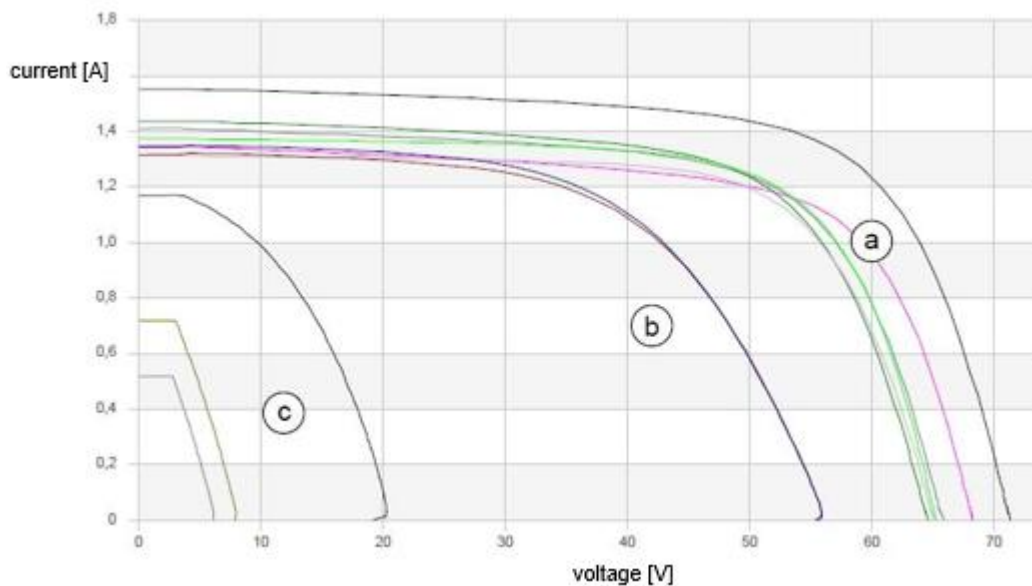


Fig 0.6 Caracteristicile tensiune-curent a 12 module solare dintr-un șir cu diferite niveluri de deteriorare PID

2.4.3 Montaje experimentale

Montajele experimentale descrise în teză urmăresc accelerarea sau simularea condițiilor care conduc la PID. Aplicarea unei tensiuni continue între circuitul activ al modulului și rama sau o suprafață conductivă permite studierea curentului de scurgere. În anumite configurații, o folie metalică aplicată pe sticla modulului reproduce contactul electric necesar pentru a analiza rezistența de șunt și traseele de scurgere.

Un element important este folosirea unei surse de înaltă tensiune continuă, inclusiv a unei soluții de tip PADCON Box HV 30 W pentru generarea tensiunii de stres. Montajul permite investigarea modulului fără a aștepta ani de exploatare și clarifică influența parametrilor de mediu. Această abordare este valoroasă deoarece transformă un fenomen lent într-un fenomen observabil într-un timp rezonabil.

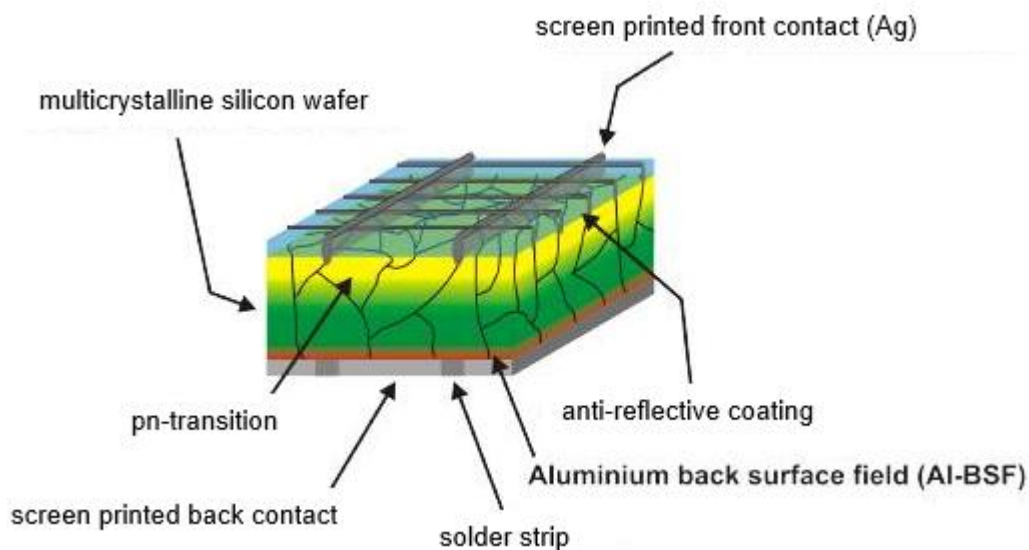


Fig 0.7 Structura unei celule solare fabricate industrial

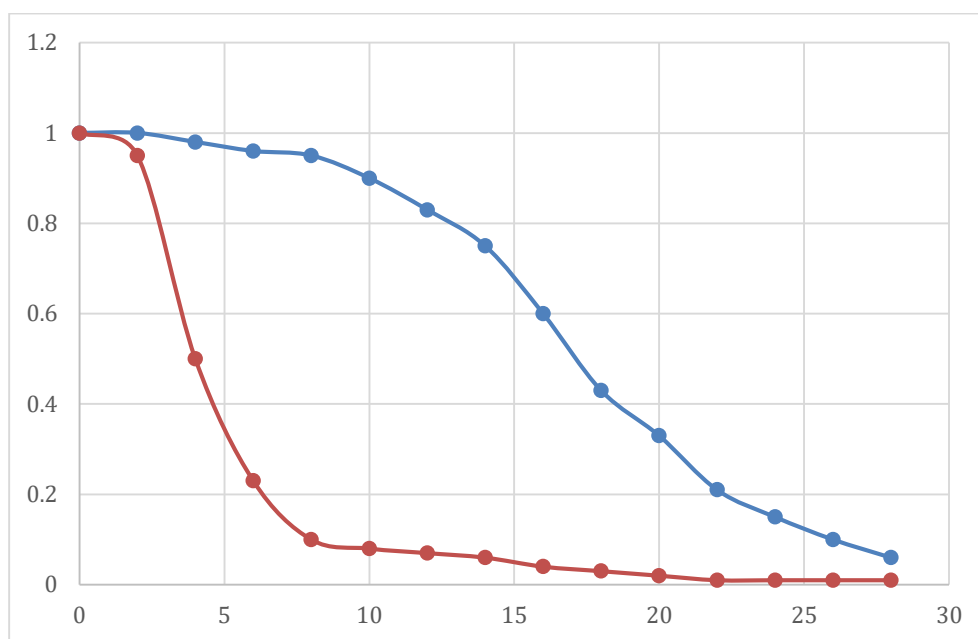


Fig 0.8 Influența degradării rezistenței shunt legate de PID asupra valorii punctului de putere maximă

2.4.4 Determinarea PID prin electroluminescență

Electroluminescența este folosită pentru a determina nu numai prezența, ci și distribuția spațială a degradării. În imaginile EL, modulele afectate de PID pot prezenta zone întunecate, adesea mai accentuate spre anumite regiuni ale modulului sau ale stringului. Această distribuție

este importantă deoarece poate indica legătura cu polaritatea, cu poziția în string sau cu diferențele de potențial față de pământ.

În comparație cu o măsurare globală de putere, EL oferă o hartă internă a modulului. Această hartă este esențială pentru decizii: dacă degradarea este localizată și incipientă, regenerarea poate fi atractivă; dacă sunt prezente fisuri, diode defecte sau degradări ireversibile, alte intervenții sunt necesare. Recomand interpretarea EL de către personal instruit, deoarece imagini asemănătoare pot avea cauze diferite.

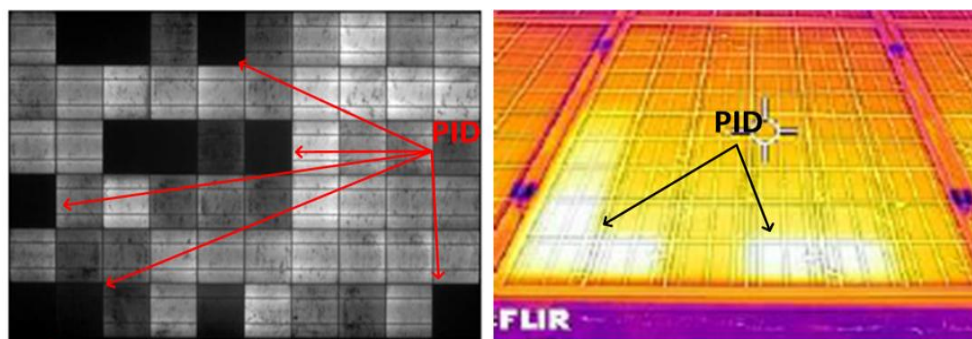


Fig 0.9 Comparație între termografia electroluminescentă și termografia în infraroșu pentru diagnosticarea PID în modulele fotovoltaice

2.5 Dezvoltarea contramăsurilor

2.5.1 Analiza și evaluarea măsurilor de protecție

Dezvoltarea contramăsurilor începe cu evaluarea soluțiilor disponibile: alegerea modulelor rezistente, adaptarea schemei de împământare, utilizarea invertoarelor compatibile, monitorizarea rezistenței de izolație, aplicarea unor dispozitive de regenerare și planificarea intervențiilor de mentenanță. Nicio soluție nu este universală, deoarece eficiența depinde de stadiul degradării și de configurația instalației.

Pun accent pe soluțiile accesibile economic. Marii producători pot modifica materialele și procesele de fabricație, dar firmele de instalare și mentenanță au nevoie de instrumente aplicabile după punerea în funcțiune. Din acest motiv, recomandările vizează identificarea timpurie, controlul condițiilor favorizante și aplicarea unor dispozitive anti-PID acolo unde analiza tehnică justifică investiția.

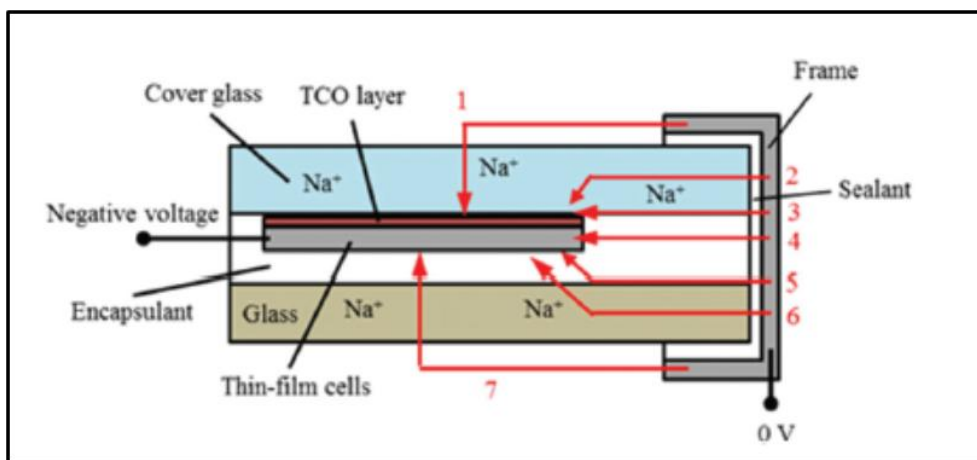


Fig 0.10 Secțiune transversală a unui modul fotovoltaic cu peliculă subțire din sticlă în spate, care arată posibilele căi de migrare a ionilor de sodiu sub tensiune negativă aplicată.

2.5.2 Montaj experimental general

Montajul experimental general este conceput pentru a separa influența factorilor principali: tensiunea aplicată, umiditatea, temperatura și iradianța. Prin măsurarea curentului de scurgere în condiții controlate, se poate observa cât de mult se modifică riscul PID atunci când mediul devine mai umed sau mai cald. Această strategie este relevantă pentru centralele la sol, unde modulele și structurile sunt expuse direct intemperiei.

Un avantaj al montajului este caracterul său didactic și practic. El arată că PID nu este o noțiune abstractă, ci un fenomen măsurabil prin curenți mici, dar cu efecte mari în timp. Pentru mentenanță, măsurarea curentului de scurgere poate deveni un indicator de avertizare, mai ales când este corelată cu datele de mediu.

2.5.3 Considerații generale asupra metodelor de testare

Testarea PID necesită prudență. Un test accelerat poate evidenția susceptibilitatea, dar nu reproduce perfect durata de viață reală. În același timp, un test de teren fără controlul variabilelor poate conduce la concluzii neclare. Propun o combinație: teste cu stres pentru înțelegerea mecanismului și observații în exploatare pentru validarea relevanței practice.

În interpretarea rezultatelor trebuie evitate concluziile bazate pe o singură măsurare. De exemplu, un curent de scurgere ridicat într-o zi umedă nu înseamnă automat degradare ireversibilă, dar indică un regim de risc. La fel, o caracteristică I-V degradată poate proveni din umbră, murdărie sau defecte de contact. Diagnosticul corect apare din convergența probelor.

2.5.4 Metode de testare cu stres

Metodele de testare cu stres constau în aplicarea unor tensiuni continue ridicate pentru a accelera procesele care, în exploatare, se produc lent. Această abordare permite identificarea modulelor sensibile și verificarea ipotezei potrivit căreia diferențele de potențial față de pământ și curenții de scurgere reduc rezistența de șunt. Prin variația condițiilor de mediu se observă cât de mult contribuie umiditatea și temperatura.

Din punct de vedere practic, testele cu stres oferă informații utile pentru selecția modulelor și pentru evaluarea riscului în instalațiile existente. Ele trebuie realizate cu respectarea regulilor de

siguranță, deoarece tensiunile implicate pot fi periculoase. Subliniez necesitatea personalului calificat și a documentării precise a parametrilor aplicați.

2.5.5 Montaj experimental cu cost redus pentru investigarea PID

Una dintre contribuțiile aplicative ale tezei este ideea unui montaj de investigare cu cost redus, adecvat firmelor mici și mijlocii. Acest montaj nu înlocuiește laboratorul certificat, dar permite înțelegerea tendințelor și compararea comportamentului modulelor. Prin folosirea unei surse de tensiune, a unor contacte controlate și a instrumentelor de măsurare, se poate urmări evoluția curentului de scurgere și se pot identifica module suspecte.

Valoarea montajului constă în faptul că transformă mentenanța într-o activitate bazată pe date. O firmă care instalează centrale poate verifica module, poate documenta comportamentul acestora și poate fundamenta decizii privind regenerarea sau înlocuirea. Astfel, cunoașterea PID devine accesibilă în practica obișnuită, nu rămâne limitată la cercetarea industrială de nivel mare.

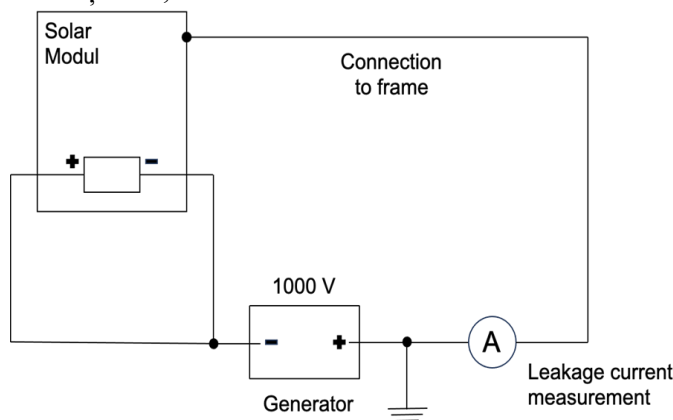


Fig 2.36 Schema unui test de curent de scurgere de înaltă tensiune pentru un modul fotovoltaic, ilustrând solicitarea electrică dintre circuitul modulului și cadrul împământat în investigațiile legate de PID.



Fig 0.11 Montaj experimental.

2.5.6 Curentul de scurgere în funcție de umiditate

Rezultatele experimentale arată clar că umiditatea este un factor major. În studiul de caz menționat în concluziile tezei, creșterea umidității relative de la 58% la 85% a condus la o creștere de aproximativ 215% a curentului de scurgere. Această valoare confirmă observațiile de teren potrivit cărora perioadele umede, ploile și sezonul rece pot accentua riscul PID.

Explicația este legată de scăderea rezistenței suprafețelor și a căilor de izolație atunci când apa, impuritățile și contaminanții creează trasee conductoare. Pentru mentenanță, concluzia este directă: inspecțiile după perioade umede au valoare ridicată, iar comparațiile de randament trebuie interpretate ținând seama de condițiile de umiditate.

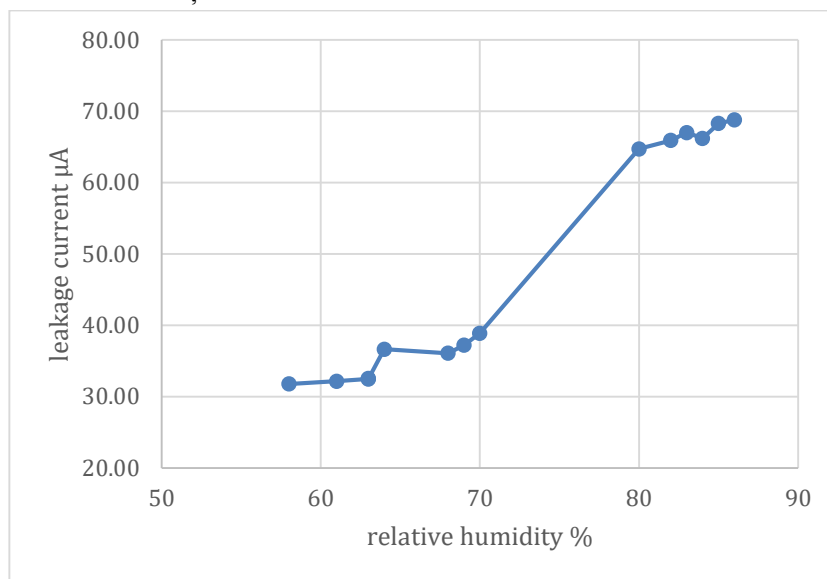


Fig 0.12 Dependența curentului de scurgere de umiditate.

2.5.7 Curentul de scurgere în funcție de temperatură

Temperatura influențează mobilitatea purtătorilor de sarcină și comportamentul materialelor. În cazul analizat, creșterea temperaturii de la 21°C la 86°C a determinat o creștere de aproximativ 462% a curentului de scurgere. Rezultatul evidențiază faptul că perioadele calde, mai ales combinate cu umiditate, pot crea condiții severe de stres pentru module.

Pentru centralele fotovoltaice, această concluzie este importantă deoarece temperaturile reale ale modulelor pot depăși mult temperatura aerului. Un modul expus intens la soare, cu ventilare insuficientă sau montat în condiții particulare, poate ajunge la regimuri termice care amplifică degradarea. Monitorizarea temperaturii modulelor nu este doar o corecție pentru randament, ci și un indicator de risc.

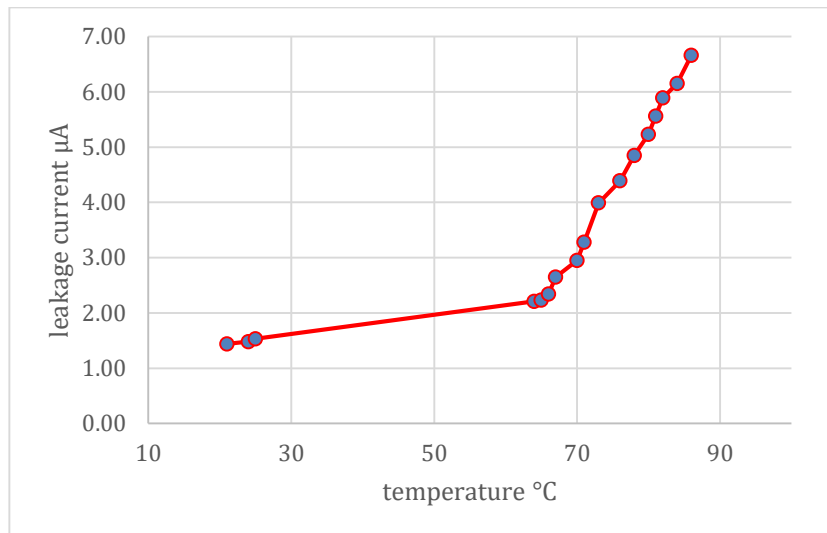


Fig 0.13 Dependența curentului de scurgere de temperatură.

2.5.8 Curentul de scurgere în funcție de iradianță

Un rezultat interesant al tezei este relația inversă observată între iradianță și curentul de scurgere în anumite condiții. Scăderea iradianței de la 1104 W/m² la 60 W/m² a fost asociată cu o creștere de aproximativ 224% a curentului de scurgere. Această observație susține ideea că riscul PID poate deveni mai acut în perioade cu lumină redusă, umiditate ridicată și temperaturi favorabile scurgerilor.

Pentru operatori, rezultatul are consecințe practice: analiza PID nu trebuie limitată la orele de producție maximă. Fenomenul are legătură și cu regimul nocturn sau cu intervalele în care invertorul nu produce. De aceea, dispozitivele anti-PID care acționează noaptea pot fi eficiente, deoarece intervin exact atunci când polarizarea generatorului poate fi modificată fără a afecta producția.

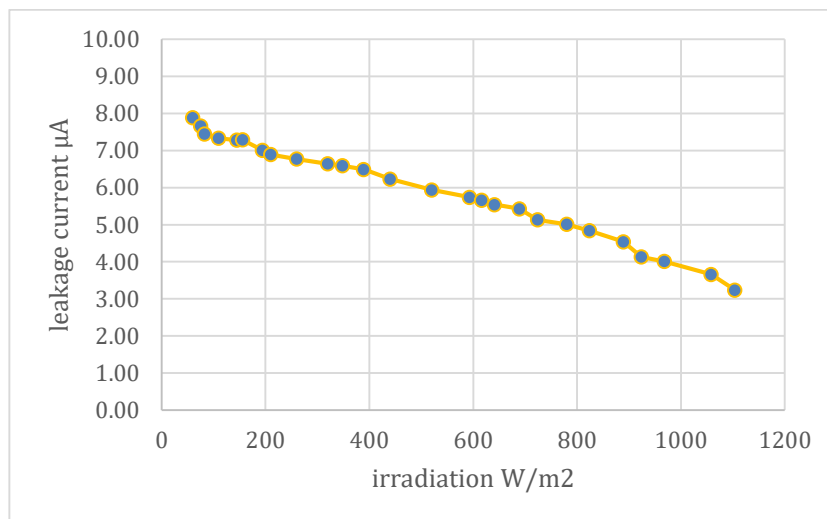


Fig 0.14 Influența iradierii solare asupra curentului de scurgere

2.5.9 Montaje suplimentare pentru studierea influențelor asupra PID

Montajele suplimentare permit verificarea influenței contactului cu rama, a calității împământării, a contaminării suprafețelor și a poziției modulului în string. Tratez aceste variabile ca posibile explicații pentru diferențele observate între module sau între zone ale aceleiași centrale. O instalație reală nu este perfect uniformă: cablurile, contactele, structura și expunerea pot varia local.

Prin aceste experimente, arăt că PID este un fenomen sistemic. Nu poate fi atribuit exclusiv modulului, invertorului sau mediului. El apare din interacțiunea dintre toate acestea. Această viziune justifică un plan de mentenanță care să includă atât partea electrică, cât și partea mecanică și ambientală.



Fig 0.15 Modul fotovoltaic acoperit cu folie de aluminiu



Fig 0.16 Modul fotovoltaic umezit

2.5.10 Evaluarea performanței modului prin caracteristica I-V

În finalul capitolului, performanța modulelor este evaluată prin caracteristici I-V. Această evaluare arată efectul degradării asupra puterii maxime și permite compararea modulelor înainte și după stres sau înainte și după regenerare. O reducere a curentului, o formă modificată a curbei sau o scădere a factorului de umplere indică pierderi funcționale.

Corelarea I-V cu EL și curentul de scurgere oferă un diagnostic robust. Imaginea EL arată celulele afectate, curba I-V arată consecința energetică, iar măsurarea curentului de scurgere explică mecanismul. Această triadă este una dintre ideile metodologice puternice ale tezei.



Fig 0.17 Aparat de măsurare curbă caracteristică HT IV-400 cu senzor de radiații

CAPITOLUL 3. METODE DE REDUCERE A EFECTELOR PID

3.1 Contramăsuri reversibile în module fotovoltaice cristaline

Capitolul al treilea discută metodele de reducere a efectelor PID, cu accent pe contramăsurile reversibile. În modulele cristaline, degradarea produsă prin polarizare și curenți de scurgere poate fi, în anumite limite, redusă prin aplicarea unei polarități inverse sau a unei tensiuni pozitive controlate față de pământ, de regulă în timpul nopții. Scopul este deplasarea sarcinilor în sens opus și refacerea parțială a comportamentului electric al celulelor.

În propria mea centrală de la Eichendorf, am utilizat dispozitive PADCON Float Controller SI, cunoscute ca PID-box-uri. Acestea sunt conectate la invertoare și aplică pe timpul nopții o tensiune pozitivă ridicată, de ordinul până la 960-1000 V, pentru regenerarea modulelor afectate. Soluția este potrivită pentru sisteme fără împământarea directă a generatorului și trebuie selectată în funcție de topologia instalației.



Fig 0.1 Invertor, vedere din spate cu PADCON PID-Box (Float Controller SI).



Fig 0.2 PADCON PID-Box (Float Controller SI).

Un avantaj major al acestei soluții este caracterul său operațional: dispozitivul lucrează fără demontarea modulelor și poate fi integrat în exploatarea normală. Pentru firmele de mentenanță, acest tip de intervenție este realist. Nu presupune reproiectarea modulelor, ci adaptarea sistemului pentru a contracara regimul de polarizare care a favorizat degradarea.

Totuși, avertizez că regenerarea nu trebuie privită ca reparație miraculoasă. Dacă PID a avansat prea mult, dacă există defecte mecanice sau dacă materialele au suferit degradări

ireversibile, rezultatul poate fi incomplet. De aceea, momentul intervenției este decisiv. Detectarea timpurie crește șansa ca măsura reversibilă să recupereze o parte semnificativă din performanță.

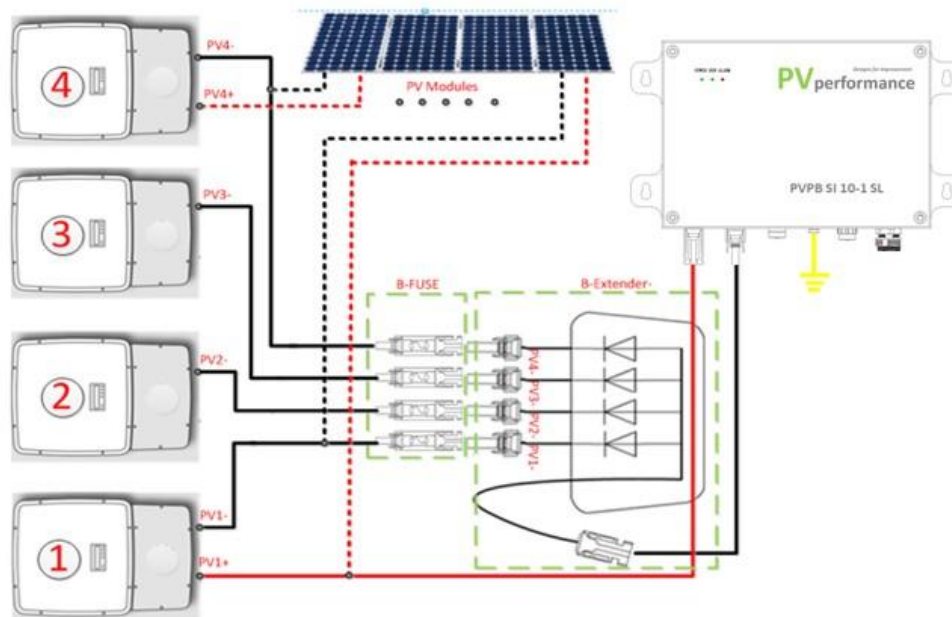


Fig 0.3 Cutii PID pentru sisteme cu invertore-șir

3.2 Considerații asupra timpului de regenerare

Timpul de regenerare depinde de severitatea degradării, de tehnologia modulului, de tensiunea aplicată, de temperatura ambientală și de durata zilnică de funcționare a dispozitivului anti-PID. În cazul centralelor mari, regenerarea se produce pe parcursul multor nopți, iar rezultatul trebuie urmărit prin comparații de producție, I-V și, ideal, electroluminescență.

Arăt că regenerarea termică sau naturală poate exista, dar este lentă și greu de controlat. Dispozitivele dedicate oferă un regim mai previzibil. Monitorizarea după instalarea unui PID-box este esențială: dacă performanța se stabilizează sau crește, intervenția este justificată; dacă nu, trebuie căutate cauze suplimentare sau trebuie evaluată înlocuirea modulelor.

3.3 Limitele contramăsurilor

Contramăsurile au limite tehnice, economice și de compatibilitate. Ele nu pot compensa defecte de fabricație severe, fisuri celulare extinse, diode defecte sau degradări ale materialelor care au devenit ireversibile. De asemenea, nu toate topologiile de inverter și împământare permit aplicarea aceleiași soluții. O intervenție greșită aleasă poate să nu producă efect sau poate crea riscuri suplimentare.

În plus, reducerea PID nu elimină necesitatea prevenirii. Dacă mediul rămâne favorabil, dacă structura este foarte conductivă, dacă izolația este degradată sau dacă monitorizarea lipsește, fenomenul poate reapărea. Propun, așadar, o abordare combinată: contramăsură tehnică, monitorizare continuă și verificări periodice.

3.4 Considerații economice și efecte ale PID

Impactul economic al PID este ilustrat prin centrala de 509,355 kWp. Într-un calcul simplificat, aceeași capacitate instalată poate produce semnificativ mai puțină energie atunci când

degradarea reduce randamentul. Menționez o situație în care producția anuală ar scădea de la 509.355 kWh/an la 356.548,5 kWh/an, ceea ce înseamnă o pierdere de aproximativ 152.806,5 kWh/an. O asemenea diferență schimbă radical rentabilitatea investiției.

Costul unui dispozitiv anti-PID, al unei campanii de electroluminescență sau al unei inspecții profesionale trebuie comparat cu pierderea anuală de producție. În multe cazuri, diagnosticarea timpurie este mult mai ieftină decât pierderea repetată de energie. De aceea, tratez mentenanța ca investiție în continuitatea veniturilor, nu ca cheltuială administrativă.

Pentru operatori, analiza economică trebuie să includă și riscul juridic. O centrală cu PID nedocumentat poate pierde atât producție, cât și posibilitatea de a recupera costuri prin garanție. Documentarea tehnică, rapoartele de măsurare și istoricul de monitorizare devin instrumente de protecție financiară.

CAPITOLUL 4. PLAN PROPUȘ DE MONITORIZARE ȘI MENTENANȚĂ PENTRU O CENTRALĂ FOTOVOLTAICĂ MEDIE LA SOL

4.1 Scopul planului

Capitolul al patrulea transformă rezultatele cercetării într-un plan de monitorizare și mentenanță pentru o centrală fotovoltaică medie la sol, de tipul PV Eichendorf. Scopul planului este detectarea timpurie a degradărilor, menținerea performanței energetice, reducerea riscului de avarii și documentarea tehnică a stării instalației. Planul are caracter practic și poate fi adaptat de firme de mentenanță sau operatori.

Elementul esențial este periodicitatea. PID nu poate fi gestionat printr-o singură inspecție anuală. El cere monitorizare zilnică, observații săptămânale, inspecții lunare și campanii diagnostice mai ample la intervale stabilite. Această structură permite identificarea deviațiilor înainte ca ele să se transforme în pierderi majore.

4.2 Filosofia generală a mentenanței

Filosofia propusă este una preventivă și predictivă. Mentenanța nu se limitează la repararea componentelor defecte, ci urmărește semnale slabe: scăderea performanței relative între stringuri, creșterea curentului de scurgere, modificarea rezistenței de izolație, zone termice anormale sau apariția unor imagini EL suspecte. În acest mod, intervenția se face înainte ca defectul să devină sever.

Planul integrează trei tipuri de informații: date de exploatare, inspecții în teren și teste specializate. Datele arată tendința, terenul arată starea fizică, iar testele specializate confirmă mecanismul. Această combinație reduce riscul de diagnostic greșit și permite prioritizarea intervențiilor.

4.3 Pachetul de referință la punerea în funcțiune sau la preluare

La punerea în funcțiune sau la preluarea instalației este necesar un pachet de referință: scheme electrice, configurații de stringuri, fișe tehnice, rezultate I-V, fotografii, imagini termografice, valori de izolație și, dacă este posibil, imagini EL de bază. Fără această referință, orice degradare viitoare este greu de cuantificat.

Pachetul de referință are și rol juridic. El stabilește starea inițială și permite compararea ulterioară. În cazul unei reclamații, operatorul poate arăta când a apărut deviația și cum a evoluat. Pentru PID, această urmă documentară este esențială.

4.4 Monitorizare zilnică și continuă

Monitorizarea zilnică include urmărirea producției totale, a producției pe inverter, a producției pe string acolo unde este disponibilă, a erorilor inverterului și a condițiilor meteo. Scopul nu este interpretarea fiecărei variații, ci identificarea diferențelor persistente între zone comparabile ale centralei.

În context PID, scăderea lentă și sistematică a performanței unui grup de module sau a unui string poate fi primul semnal. Deoarece PID este influențat de mediu, analiza trebuie făcută pe perioade suficient de lungi și prin comparație cu segmente similare.

4.5 Rutina săptămânală

Rutina săptămânală presupune verificarea rapoartelor de producție, a alarmelor, a curățeniei generale și a evenimentelor meteorologice recente. Dacă au existat ploi, ceață, umiditate persistentă sau temperaturi ridicate, operatorul trebuie să acorde atenție sporită stringurilor cu randament scăzut.

În această etapă se pot planifica inspecții punctuale. Un avantaj al rutinei săptămânale este că păstrează contactul operațional cu instalația fără costuri mari. Ea previne situația în care un defect este observat abia după luni de pierderi.

4.6 Inspecția lunară în teren

Inspecția lunară în teren include verificarea vizuală a modulelor, a structurii, a cablurilor, a cutiilor de conexiune, a traseelor de cablu, a împământării și a eventualelor semne de deteriorare. Se urmăresc fisuri, murdărire, delaminare, urme de arsură, contacte slăbite, deteriorări mecanice sau vegetație care poate produce umbriri.

Pentru PID, inspecția vizuală nu confirmă direct fenomenul, dar identifică factori favorizanți: umiditate reținută, murdărie conductivă, legături la pământ deteriorate sau cabluri expuse. În plus, inspecția lunară poate selecta zonele care merită măsurări suplimentare.

4.7 Blocul trimestrial de mentenanță

La interval trimestrial, planul recomandă o verificare mai detaliată a conexiunilor electrice, a protecțiilor, a sistemului de împământare și a parametrilor de izolație. În centralele la sol, structura metalică și condițiile de sol pot influența traseele de scurgere, deci verificarea continuității și a rezistențelor este importantă.

În aceeași etapă pot fi analizate datele de producție pe ultimele luni pentru a vedea dacă există tendințe de scădere neexplicate. O tendință corelată cu perioade umede sau calde poate indica necesitatea unei campanii PID.

4.8 Campania diagnostică semestrială

4.8.1 Termografie

Termografia semestrială este recomandată pentru identificarea defectelor vizibile termic. Ea trebuie efectuată în condiții de iradianță suficientă, cu sistemul în funcțiune și cu documentarea condițiilor meteo. Rezultatele se compară cu imaginile anterioare pentru a identifica evoluții.

Pentru PID, termografia poate indica zone cu comportament anormal, dar trebuie confirmată prin metode suplimentare. Totuși, ca metodă de screening, ea este foarte eficientă pentru centrale mari.

4.8.2 Trasarea curbelor I-V

Campania I-V semestrială oferă date cantitative despre puterea stringurilor și modulelor. Ea permite identificarea deviațiilor față de valorile de referință și selectarea zonelor cu pierderi semnificative. În combinație cu termografia, trasarea curbelor I-V poate separa defectele de contact de degradările distribuite.

În cazul unei suspiciuni PID, I-V trebuie completată cu EL sau cu măsurări de curent de scurgere. Curba I-V arată efectul, nu întotdeauna cauza.

4.9 Revizia anuală majoră și analiza diagnostică

Revizia anuală include audit vizual și mecanic complet, termografie pe întreaga centrală, campanie I-V, eventual campanie EL și, opțional, investigații UV. Această revizie este momentul în care se actualizează dosarul tehnic al centralei și se stabilesc prioritățile pentru anul următor.

În privința PID, revizia anuală trebuie să includă analiza eficienței eventualelor dispozitive anti-PID și verificarea apariției unor stringuri noi cu simptome. Dacă se observă recurență, trebuie reevaluate schema electrică, împământarea, condițiile de mediu și compatibilitatea echipamentelor.

4.10 Inspecții declanșate de evenimente

Planul prevede inspecții suplimentare după evenimente precum furtuni, grindină, inundații, perioade lungi de umiditate, temperaturi extreme sau erori repetate ale invertoarelor. Aceste evenimente pot accelera degradări existente sau pot crea defecte noi.

Pentru PID, inspecțiile după perioade umede sunt deosebit de importante, deoarece am evidențiat legătura puternică dintre umiditate și curentul de scurgere. O intervenție rapidă poate preveni interpretarea greșită a pierderilor și poate fundamenta o contramăsură.

4.11 Nivelul de monitorizare și intervenție specific PID

Nivelul specific PID include urmărirea indicatorilor de performanță relativă, măsurarea curenților de scurgere în zone suspecte, verificarea rezistenței de izolație, efectuarea de EL pentru confirmare și evaluarea oportunității instalării sau ajustării unui PID-box. Acest nivel nu se aplică identic tuturor centralelor, ci se activează în funcție de risc și simptome.

Un principiu practic este acela că PID trebuie tratat înainte de a produce pierderi mari. Dacă degradarea este depistată într-un stadiu incipient, contramăsurile au șanse mai bune. Dacă se așteaptă până când pierderea este evidentă în veniturile anuale, recuperarea poate fi incompletă.

4.12 Acțiuni corective pe categorii de defecte

Planul propune diferențierea defectelor: murdărire, umbrire, contacte slabe, defecte de diodă, fisuri, degradare PID, probleme de invertor sau probleme de împământare. Fiecare categorie are acțiuni corective diferite. Pentru PID, acțiunea poate include instalarea de dispozitive de regenerare, modificări ale schemei de potențial, măsurări suplimentare și monitorizare după intervenție.

Clasificarea defectelor previne risipa. De exemplu, curățarea modulelor nu rezolvă PID, iar un PID-box nu repară un cablu ars. Menținerea eficientă începe cu identificarea corectă a cauzei.

4.13 Rezumatul periodicităților recomandate

Activitate	Periodicitate recomandată	Rol principal
Monitorizare producție	zilnic/continuu	detectarea deviațiilor
Analiză rapoarte și alarme	săptămânal	identificarea tendințelor
Inspecție vizuală în teren	lunar	observarea defectelor și factorilor favorizanți
Verificări electrice/împământare	trimestrial	controlul siguranței și al izolației
Termografie și I-V	semestrial/anual	diagnostic energetic și termic
EL și investigații PID	anual sau la suspiciune	confirmare vizuală și decizie de regenerare

Tabelul sintetizează logica planului: activitățile dese sunt simple și ieftine, iar activitățile rare sunt mai complexe și mai costisitoare. Scopul este ca metodele avansate să fie folosite acolo unde datele preliminare justifică intervenția.

4.14 Piese de schimb și consumabile

Pentru o centrală medie la sol, recomand existența unor piese și consumabile disponibile: conectori, siguranțe, cabluri, elemente de fixare, dispozitive de protecție, senzori, eventual module de rezervă și accesorii pentru măsurări. Disponibilitatea lor reduce timpul de nefuncționare.

În context PID, este utilă păstrarea documentației pentru dispozitivele anti-PID și a unui plan de verificare a funcționării acestora. Un PID-box instalat, dar neverificat, nu reprezintă o garanție.

4.15 Documentație și indicatori de performanță

Documentația este un element central al planului. Fiecare inspecție, măsurare, imagine și intervenție trebuie arhivată. Indicatorii de performanță includ producția specifică, disponibilitatea, pierderile relative, numărul de alarme, timpul de remediere și evoluția stringurilor suspecte.

Pentru PID, istoricul este decisiv. Un raport EL izolat este util, dar valoarea sa crește atunci când poate fi comparat cu date de producție, I-V și măsurări anterioare. Documentația transformă mentenanța într-un proces defensibil tehnic și juridic.

4.16 Recomandare practică finală

Recomandarea practică a capitolului este ca operatorii să nu aștepte pierderi evidente înainte de a acționa. O centrală fotovoltaică la sol trebuie tratată ca infrastructură energetică, nu ca ansamblu static de module. Monitorizarea și mentenanța sistematică sunt condiții ale performanței pe termen lung.

În special pentru PID, combinația dintre date, diagnostic și intervenție timpurie este mai eficientă decât reacția târzie. Planul propus în teză oferă un cadru aplicabil și ajustabil, orientat către costuri rezonabile și către realitățile firmelor de mentenanță.

CAPITOLUL 5. ABORDĂRI ACTUALE ȘI VIITOARE ALE PROBLEMEI PID

5.1 Perspectiva mea asupra viitorului PID

Capitolul al cincilea privește PID ca problemă care va rămâne relevantă și în viitor. Creșterea tensiunilor de sistem, dezvoltarea centralelor mari, apariția unor tehnologii noi de module și presiunea economică asupra costurilor pot modifica modul de manifestare a degradărilor, dar nu elimină necesitatea înțelegerii mecanismelor electrice.

Consider că viitorul reducerii PID se află la intersecția dintre fabricație, proiectare, exploatare și mentenanță. Producătorii pot îmbunătăți materialele, dar instalatorii și operatorii au responsabilitatea de a crea condiții de funcționare corecte. Această repartizare a responsabilității este una dintre ideile de fond ale tezei.

5.2 Tensiuni înalte în sistemele fotovoltaice

Tendința de creștere a tensiunilor în sistemele fotovoltaice urmărește reducerea pierderilor și optimizarea costurilor, dar poate amplifica diferențele de potențial față de pământ. Din perspectiva PID, tensiunea de sistem nu este doar parametru de proiectare energetică, ci și factor de stres pentru module.

Prin urmare, centralele cu tensiuni ridicate trebuie proiectate cu atenție la izolație, împământare, compatibilitatea modulelor și monitorizarea curenților de scurgere. O eficiență electrică mai bună nu trebuie obținută cu prețul unei degradări accelerate.

5.3 Materiale pentru producția modulelor. Optimizare

Materialele modulului au rol esențial: sticla, encapsulantul, stratul antireflex, folia posterioară și rama influențează migrația ionilor și rezistența la curenți de scurgere. Optimizarea acestor materiale poate reduce susceptibilitatea la PID. Producătorii au responsabilitatea de a testa modulele în regimuri relevante și de a comunica transparent rezistența la PID.

În același timp, instalatorii trebuie să înțeleagă că un modul mai ieftin, dar insuficient documentat, poate deveni costisitor în exploatare. Susțin o cultură tehnică în care alegerea materialelor se face pe baza durabilității, nu doar a puterii nominale.

5.4 Condiții de mediu

Condițiile de mediu rămân un factor decisiv. Arăt experimental că umiditatea și temperatura cresc curentul de scurgere, iar reducerea iradianței poate fi asociată cu creșterea riscului în anumite regimuri. Centralele amplasate în zone umede, cu ceață sau cu sol conductiv necesită atenție specială.

Viitorul monitorizării PID va include probabil integrarea datelor meteo cu datele electrice. Un sistem inteligent ar putea semnală automat combinațiile de umiditate, temperatură și scădere de performanță care justifică o inspecție.

5.5 Alegerea invertorului

Alegerea invertorului va continua să fie un element critic. Invertoarele fără transformator sunt eficiente și larg utilizate, dar trebuie evaluate împreună cu modulele și împământarea.

Compatibilitatea anti-PID, posibilitatea utilizării dispozitivelor de regenerare și modul de comportare față de pământ sunt criterii de proiectare.

O recomandare importantă este ca proiectantul să nu trateze inverterul separat de fenomenul PID. Topologia electrică a inverterului poate amplifica sau reduce condițiile de stres. De aceea, documentația producătorilor și experiența în teren trebuie consultate înainte de alegere.

5.6 Alegerea metodei de împământare

Împământarea este necesară pentru siguranță, dar modul în care este realizată influențează traseele de curent de scurgere. În centralele la sol, structurile metalice conectate la pământ formează un sistem extins, cu rezistențe mici și cu interacțiuni complexe cu solul. O proiectare corectă trebuie să îmbine siguranța electrică și reducerea riscului PID.

Nu propun compromiterea siguranței, ci analizarea atentă a potențialelor. Legarea la pământ, rezistența solului, umiditatea și polaritatea stringurilor trebuie privite împreună.

5.7 Măsurile de prevenire cu PID-box-uri

PID-box-urile reprezintă o soluție practică pentru sisteme compatibile. Ele aplică în perioadele de inactivitate ale inverterului o tensiune care urmărește inversarea polarizării dăunătoare. În centralele în care PID a fost diagnosticat sau unde riscul este ridicat, aceste dispozitive pot reduce pierderile și pot extinde durata utilă a modulelor.

Cu toate acestea, instalarea lor trebuie precedată de analiză. Trebuie verificate tensiunea sistemului, schema de împământare, tipul inverterului, stadiul degradării și siguranța intervenției. Un PID-box este instrument de management al riscului, nu substitut pentru mentenanță.

5.8 Măsurile de operare și mentenanță. Inspecție regulată

Operarea corectă include inspecții regulate, curățare adecvată, verificarea conexiunilor, monitorizarea izolației, analiza rapoartelor și reacția la deviații. Susțin că mentenanța trebuie să fie planificată, documentată și adaptată riscului. În zonele sau perioadele cu risc PID ridicat, inspecțiile trebuie intensificate.

În viitor, firmele de mentenanță vor avea un rol tot mai important. Ele vor trebui să interpreteze date, să utilizeze metode imagistice și să ofere recomandări economice. PID este un exemplu de fenomen care cere profesionalizarea serviciilor post-instalare.

5.9 Importanța avertizării timpurii în diminuarea PID

Avertizarea timpurie este probabil cea mai importantă idee practică a tezei. PID este mai ușor de controlat la început decât după degradare severă. Sistemele de monitorizare trebuie să compare stringuri, să coreleze datele cu mediul și să declanșeze verificări atunci când apar tendințe suspecte.

Un sistem de avertizare timpurie nu trebuie să fie extrem de sofisticat pentru a fi util. Chiar și o analiză consecventă a producției relative, completată cu inspecții la momente bine alese, poate preveni pierderi. În instalațiile medii, această abordare este realistă și rentabilă.

CAPITOLUL 6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

6.1 Orientarea generală a tezei

Teza mea are o orientare clar aplicativă: urmăresc să explic PID, să îl măsoar, să îl diagnostichez și să propun măsuri de reducere adaptate practicii. Consider că valoarea lucrării constă în îmbinarea experienței profesionale cu investigația experimentală. Nu mă limitez la analiza literaturii, ci folosesc propria mea centrală și infrastructura disponibilă pentru a obține rezultate relevante.

Arăt că PID nu este o problemă marginală. El poate afecta randamentul, durata de viață, veniturile și credibilitatea tehnică a unei centrale fotovoltaice. De aceea, managementul PID trebuie integrat în proiectare, punere în funcțiune, mentenanță și evaluare economică.

6.2 Concluzii principale

6.2.1 PID este un mecanism progresiv cu semnificație tehnică și economică

Prima concluzie este că PID se dezvoltă progresiv și poate rămâne ascuns mult timp. Simptomele sale nu sunt neapărat vizibile, iar pierderile pot fi confundate cu variații normale. Totuși, efectul asupra producției poate fi major, astfel încât diagnosticarea devine o necesitate economică.

6.2.2 Factorii de mediu influențează puternic curentul de scurgere

Rezultatele experimentale confirmă rolul umidității, temperaturii și iradianței. Creșterea umidității de la 58% la 85% a dus la creșterea curentului de scurgere cu 215%, creșterea temperaturii de la 21°C la 86°C l-a crescut cu 462%, iar reducerea iradianței de la 1104 W/m² la 60 W/m² a condus la o creștere de 224%. Aceste valori susțin necesitatea corelării diagnosticului cu mediul.

6.2.3 Detectarea timpurie este esențială

Detectarea timpurie crește șansele de reversibilitate și reduce pierderile. Dacă PID este identificat târziu, celulele pot ajunge într-un stadiu în care regenerarea este incompletă. Măsurile preventive și monitorizarea periodică sunt, prin urmare, mai eficiente decât intervenția tardivă.

6.2.4 Contramăsurile sunt utile, dar au limite

Dispozitivele anti-PID și strategiile de regenerare pot recupera performanță, dar nu pot elimina toate formele de degradare. Eficiența lor depinde de compatibilitatea sistemului, de severitatea PID și de absența altor defecte. Ele trebuie integrate într-un plan de mentenanță, nu aplicate izolat.

6.2.5 PID are impact măsurabil asupra performanței financiare

Pierderea de energie asociată PID poate modifica rentabilitatea unei centrale. Exemplul centralei de 509,355 kWp arată că o reducere de producție poate însemna peste 150.000 kWh pierduți anual. În astfel de condiții, costurile diagnosticului și ale contramăsurilor sunt justificate economic.

6.3 Contribuții originale ale tezei

6.3.1 Integrarea teoriei cu activitatea experimentală orientată spre teren

O contribuție importantă este integrarea literaturii de specialitate cu date obținute în instalații reale și în montaje experimentale. Această integrare face ca rezultatele să fie relevante pentru practica de instalare și mentenanță, nu doar pentru cercetarea de laborator.

6.3.2 Clarificarea experimentală a rolului rezistenței de șunt reduse

Evidențiez legătura dintre curenții de scurgere, reducerea rezistenței de șunt și pierderea performanței. Prin măsurări și teste cu stres, arăt cum condițiile externe pot transforma o susceptibilitate latentă într-o degradare observabilă.

6.3.3 Utilizarea complementară a metodelor de diagnostic

Demonstrez importanța combinării metodelor: I-V, termografie, UV, electroluminescență, măsurări în întuneric și măsurări de curent de scurgere. Fiecare metodă are limite, dar împreună formează un diagnostic mult mai sigur.

6.3.4 Demonstrarea importanței deciziilor de mentenanță

O altă contribuție este arătarea faptului că deciziile luate după instalare influențează puternic evoluția PID. Mentenanța nu este un serviciu secundar, ci o componentă esențială a performanței energetice pe termen lung.

6.3.5 Elaborarea unui plan detaliat pentru centrale medii la sol

Planul de monitorizare și mentenanță pentru centrale de tip PV Eichendorf este o contribuție practică distinctă. El oferă periodicitate, metode, indicatori și acțiuni corective, fiind adaptat centralelor la sol de dimensiuni medii.

6.3.6 Transformarea rezultatelor în recomandări accesibile economic

Propun soluții care nu depind exclusiv de marii producători. Arăt ce pot face firmele mici și mijlocii: diagnostic timpuriu, măsurări corecte, alegerea echipamentelor, utilizarea dispozitivelor anti-PID și documentare riguroasă.

6.4 Direcții viitoare de cercetare

Direcțiile viitoare includ dezvoltarea unor metode mai rapide de avertizare timpurie, integrarea datelor meteo cu monitorizarea electrică, studiul modulelor noi și al tehnologiilor bifaciale sau cu materiale avansate, precum și evaluarea pe termen lung a eficienței PID-box-urilor în centrale diferite.

O altă direcție este standardizarea unor proceduri accesibile pentru firmele de mentenanță. Dacă metodele de diagnostic devin mai clare și mai ieftine, PID va putea fi gestionat înainte de a produce pierderi mari. Cercetarea viitoare ar trebui să lege laboratorul, terenul și analiza economică într-un cadru comun.

În concluzie, demonstrez că fenomenul PID este un subiect de inginerie electrică cu implicații directe asupra tranziției energetice. Fiabilitatea fotovoltaicului nu depinde numai de soare și de puterea nominală a modulelor, ci de capacitatea inginerilor de a înțelege, măsura și controla mecanismele de degradare care apar în timp.

BIBLIOGRAFIE ȘI LUCRĂRI PROPRII

(Buchholz 2010) Buchholz, C., "Neue trafolose Wechselrichter-Topologie für Dünnschicht-Technologien," in *Proceedings, Grundlagenseminar Thin-Film Photovoltaics 2010*, Würzburg, Germany, 8–9 Feb. 2010, p. 73.

(del Cueto et al. 2005) J.A. del Cueto, D. Trudell, and W. Sekulic, "Capabilities of the High Voltage Stress Test System at the Outdoor Test Facility", DOE Solar Energy Technologies Program Review Meeting, NREL ICP-520-38955, 2005

(EN 62446-1 2018) EN 62446-1:2016/A1:2018, *Photovoltaic (PV) systems – Requirements for testing, documentation and maintenance – Part 1: Grid connected systems – Documentation, commissioning tests and inspection*. Brussels: CENELEC, 2018.

(Fraunhofer Institute 2013) Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2013, Seite 54)

(Hirschl 2015) R. Hirschl, Potenzialinduzierte Degradation – Wirtschaftliche und wissenschaftliche Aspekte, ENcome Energy Performance GmbH, Würzburg, Germany, Nov. 10, 2015

(IEC 60904-1 2020), IEC 60904-1:2020, *Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2020.

(IEC 60904-13 2018), IEC TS 60904-13:2018, *Photovoltaic devices – Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2018.

(IEC 61215 2005) IEC 61215:2005, *Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2005.

(IEC 61730-2 2023), IEC 61730-2:2023, *Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2: Requirements for testing*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2023.

(IEC 61829 2015), IEC 61829:2015, *Photovoltaic (PV) array – On-site measurement of current-voltage characteristics*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2015.

(IEC 62804-1 2025) IEC TS 62804-1:2025, *Photovoltaic (PV) modules – Test methods for the detection of potential-induced degradation – Part 1: Crystalline silicon*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025

(IEC 62804-1-1 2020) IEC TS 62804-1-1:2020, *Photovoltaic (PV) modules – Test methods for the detection of potential-induced degradation – Part 1-1: Crystalline silicon – Delamination*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.

(IEC 62804-2 2022) IEC TS 62804-2:2022, *Photovoltaic (PV) modules – Test methods for the detection of potential-induced degradation – Part 2: Thin-film*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022.

(Jahrstorfer et al 1-2025) R. Jahrstorfer, A. Sălceanu and G. Balan, "Influence of Humidity and Temperature on Potential Induced Degradation from a Maintenance Perspective," *2025 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Iasi, Romania, 2025, pp. 513-517, doi: 10.1109/SIELMEN67352.2025.11260793.

(Jahrstorfer et al. 2021) R. Jahrstorfer and A. Salceanu, "Assessing Methods for Potential Induced Degradation in Photovoltaic Systems," *2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Iasi, Romania, 2021, pp. 266-269, doi: 10.1109/SIELMEN53755.2021.9600279

(Jahrstorfer et al. 2-2025) R. Jahrstorfer, A. Salceanu and G. Balan, "Experimental Approaches to the Influence of Shunt Resistance on Potential Induced Degradations," *2025 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Iasi, Romania, 2025, pp. 518-524, doi: 10.1109/SIELMEN67352.2025.11260788

(KEE Otto 2015) KEE Otto Feustel Libal Schumacher Partnerschaft von Rechtsanwälten mbB, Hamburg, Germany

(Luo et. al 2017) Luo, W., Khoo, Y. S., Hacke, P., Naumann, V., Lausch, D., Harvey, S. P., Singh, J. P., Chai, J., Wang, Y., Aberle, A. G., & Ramakrishna, S. (2017). Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review. *Energy & Environmental Science*, 10(1), 43–68. <https://doi.org/10.1039/C6EE02271E>

(Mertens 2022) Konrad Mertens "Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice" (German: Photovoltaik – Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis), Sixth Edition (SONNENENERGIE 2023) SONNENENERGIE. Zeitschrift für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie), 03/2023, September-November, pg.35, Berlin (in German)

(Mühleisen et al. 2019), W. Mühleisen, C. Hirschl, G. Brantegger, L. Neumaier, M. Spielberger, H. Sonnleitner, B. Kubicek, G. Ujvari, R. Ebner, M. Schwark, G.C. Eder, Y. Voronko, K. Knöbl, and L. Stoicescu. "Scientific and economic comparison of outdoor characterisation methods for photovoltaic power plants" *Renewable Energy*, 134, 321-329, April 2019, DOI: 10.1016/j.renene.2018.11.044

(Mühleisen et al. 2018) W. Mühleisen, L. Neumaier, C. Hirschl, M. Spielberger, H. Sonnleitner, G.C. Eder, R. Ebner, K. Knöbl, L. Stoicescu, "Potential-Induced Degradation (PID) of Crystalline Silicon Solar Modules: Influence of the Encapsulant and the Backsheet Resistivity," *Proceedings of the 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2018, pp. 103-106.

(Nauman et al. 2014) V. Naumann et al., "PID-shunting: Understanding from nanoscale to module level," presented at the *NREL PV Module Reliability Workshop*, Golden, CO, USA, Feb. 25–26, 2014

(Pern et al. 1996) F. J. Pern, "Degradation of ethylene-vinyl acetate (EVA) encapsulant: I. Effects of thermal aging, UV-aging, and crystal-silicon solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 41-42, pp. 587–615, 1996.

(Pingel et al. 2010) S. Pingel et al., "Potential Induced Degradation of solar cells and panels," 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, HI, USA, 2010, pp. 002817-002822, doi: 10.1109/PVSC.2010.5616823.

(Schlothauer et al. 2010), Schlothauer, J. C., Jungwirth, S., Röder, B., & Köhl, M. (2010). “Fluorescence imaging—a powerful tool for the investigation of polymer degradation in PV modules”. Photovoltaics International, 10, 149–156.

(Weber 2017) Weber, T., & Berghold, J. (2017). Potentialinduzierte Degradation bei CIGS: PID bei Kupfer-Indium/Gallium-Diselenid-Solarmodulen. SONNENENERGIE, 2017(3), 32–34.

(Wirth et al. 2014) Wirth, H. and Ferrara, C. (2014) Abschlussbericht: Definition eines Qualitätszertifikats für Photovoltaik-Module. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, available at: lubw.de

[***1] <https://www.fraunhofer.de/en.html> , accessed March 2026

[***2] <https://iea-pvps.org/> accessed March 2026

[***3] <https://www.leeds.ac.uk/news-global/news/article/5443/window-to-avoid-1-5-c-of-warming-rapidly-closing> accessed March 2026

[***4] <https://research-portal.uea.ac.uk/en/persons/phillip-williamson/> accessed March 2026

[***5] <https://www.rwth-aachen.de/cms/root/transfer/exzellenz-im-transfer/knowledge-hub/fruehere-schwerpunktthemen> accessed March 2026

[***6] <https://blogs.ed.ac.uk/davereay/just-transition/> accessed March 2026

[***7] <https://www.eupd-research.com/wp-content> accessed March 2026

[***8] <https://www.energyra.com/> accessed March 2026

[***9] <https://cubicpv.com/> accessed March 2026

[***10] <https://www.dupont.cn/> accessed March 2026

[***11] <https://www.sunman-energy.com/home> accessed March 2026

[***12] <https://www.irena.org/> accessed March 2026

[***13] <https://www.fronius.com> accessed March 2026

[***14] <https://webstore.iec.ch/en/publication/71747> accessed March 2026

[***15] <https://www.photon.info/en/magazines/> accessed March 2026

[***16] <https://photovoltaikbuero.de/pv-know-how-blog/uv-fluoreszenz-an-photovoltaikmodulen> accessed March 2026

[***17] <https://www.pvcontrol.solar/en/service-and-operation-of-spp> accessed March 2026

[***18] <https://www.solaranlage.eu/photovoltaik/technik-komponenten/solarmodule/degradation> accessed March 2026

[***19] <https://photovoltaikbuero.de/pv-know-how-blog/sich-abloesende-frontkontakte-an-solarzellen> accessed March 2026

[***20] <https://meteotest.ch/en/product/meteonorm> accessed March 2026

[***21] <https://www.solarpraxis.de> accessed March 2026

[***22] <https://www.ifeu.de/en/> accessed March 2026

[***23] <https://stock.adobe.com/contributor/206078313/alejomiranda> accessed March 2026

[***24] <https://photovoltaiksolarstrom.com/technik/photovoltaik-aufbau/module> accessed March 2026

[***25] <https://www.lehrbuch-photovoltaik.de> accessed March 2026

[***26] <https://www.sma.de/service/downloads> accessed March 2026

[***27] <http://www.aepvi.com/> accessed March 2026

Publicatiile mele:

1. **Robert Jahrstorfer** and Alexandru Sălceanu, "Assessing Methods for Potential Induced Degradation in Photovoltaic Systems," *2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Iasi, Romania, 2021, pp. 266-269, doi: 10.1109/SIELMEN53755.2021.96002791, Scopus **EID 2-s2.0-85123203332**, **IEEEExplore**.
2. **Robert Jahrstorfer**, Andrei Sălceanu and George Balan, "Influence of Humidity and Temperature on Potential Induced Degradation from a Maintenance Perspective," *2025 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Iasi, Romania, 2025, pp. 513-517, doi: 10.1109/SIELMEN67352.2025.11260793, **WOS:001669739200092**.
3. **Robert Jahrstorfer**, Andrei Sălceanu and George Balan, "Experimental Approaches to the Influence of Shunt Resistance on Potential Induced Degradations," *2025 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Iasi, Romania, 2025, pp. 518-524, doi: 10.1109/SIELMEN67352.2025.11260788, **WOS:001669739200093**.
4. **Robert Jahrstorfer** and Alexandru Sălceanu "Assessing Method for the Potential Induced Degradation in Photovoltaic Systems","Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi, Romania, 4th International Conference of the Doctoral School, May 19 - 21, 2021, Iasi, Romania, pp.123.
5. **Robert Jahrstorfer** and Andrei Sălceanu "Comparative Analysis of the Main PID Assessment Methods for PV Modules Manufactured Using Polycrystalline Silicon Technology ","Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi, Romania, 9th International Conference of the Doctoral School, May 13 - 15, 2026, Iasi, Romania, pp. 39.
6. **Robert Jahrstorfer** and Andrei Sălceanu " Maintenance plan for a medium-sized ground-mounted photovoltaic plant ","Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi, Romania, 9th International Conference of the Doctoral School, May 13 - 15, 2026, Iasi, Romania, pp. 40.