

MODELAREA CENTRALELOR FOTOVOLTAICE PENTRU INTEGRAREA ÎN SISTEMUL ENERGETIC UTILIZÂND SOFTWARE- UL PSCAD ȘI EVALUAREA CONFORMITĂȚII

Marius FILIȘANU¹, Gabriel TĂNĂSESCU²

^{1, 2}SC SIMTECH INTERNATIONAL SRL

mfilisanu@simtech-international.ro¹, gtanasescu@simtech-international.ro²

Rezumat. În acest articol este dezvoltat un model complex al unei centrale fotovoltaice cu puterea instalată de 9,99 MW. Model este realizat cu ajutorul PSCAD-EMTDC, iar acesta permite reglajul puterii active și a puterii reactive. Pe baza reglajului de putere se determină diagrama P-Q în punctul de racordare. Totodată centrala studiată este integrată în Sistemul Energetic Național, deci o să se determine și diagrama P-Q pe baza unor măsurători. În final modelul propus o să fie validat pe baza măsurătorilor și o să se verifice conformitatea centralei fotovoltaice din punct de vedere al condițiilor tehnice de racordare a centralelor electrice, de precizat este faptul că centrala studiată se încadrează în categoria C. Concluziile evidențiază că modelul complex permite o validare corectă a centralei fotovoltaice pentru toate cerințele de conformitate cerute centralelor de categorie C, fiind indispensabil pentru evaluarea reală a integrării în rețea.

1. INTRODUCERE

În ultimii ani, atât numărul, cât și puterea centralelor fotovoltaice din România au crescut semnificativ. Primele centrale fotovoltaice au apărut în anul 2011, având o putere totală de 1 MW, iar în anii următori această putere a crescut până la ordinul miilor de MW [1]. Ulterior apariției centralelor fotovoltaice, au fost elaborate norme tehnice pentru integrarea acestora în Sistemul Electroenergetic Național (SEN). Pe măsură ce puterea centralelor fotovoltaice a crescut, cerințele tehnice impuse au devenit din ce în ce mai stricte [2-3].

În acest articol este prezentat un model al unei centrale fotovoltaice existente în Sistemul Electroenergetic Național (SEN), cu o putere instalată de 9.99 MW, racordată la nivelul de 20 kV într-o stație de distribuție 110/20 kV. În conformitate cu informațiile prezentate anterior și cu ordinele tehnice care clasifică centralele fotovoltaice în mai multe categorii, centrala analizată în acest articol se încadrează în categoria C [4].

Modelul cuprinde următoarele elemente: panouri fotovoltaice, un convertor continuu–continuu, un invertor, linii electrice în cablu și transformatoare. Ulterior, pe baza diagramei P–Q a invertorului, pusă la dispoziție de către producător și a reglajului de putere activă cât și reactivă se poate determina diagrama P–Q în punctul de racordare [2].

Pe baza diagramei P–Q obținute în punctul de racordare sunt analizate cerințele de racordare la Sistemul Electroenergetic Național (SEN), respectiv limitarea factorului de putere la valoarea de 0,9, atât în regim capacitiv, cât și inductiv, precum și condiția ca puterea reactivă injectată în punctul de racordare, în situația în care puterea activă produsă este nulă, să fie mai mică de 0,5 MVar [3].

În final, rezultatele obținute prin simulare sunt validate prin intermediul unor măsurători. Așa cum a fost precizat anterior, centrala este existentă în Sistemul Electroenergetic Național (SEN). Echipamentul de achiziție a datelor a fost montat în punctul de conexiune, mai exact în celula de măsură de 20 kV. Ulterior, diagrama P–Q obținută prin măsurători este comparată cu diagrama P–Q obținută din simulare, în acest mod fiind validat modelul de simulare.

2. MODELUL CENTRALEI FOTOVOLTAICE

2.1 Elemente componente

În acest subcapitol sunt prezentate elementele principale ale modelului propus, printre care se numără panourile fotovoltaice, convertorul continuu–continuu, invertorul și elementele de racordare la Sistemul Electroenergetic Național (SEN), prezentate în Fig. 1 și reprezentate de linii electrice în cablu și transformatoare [2], [5-7]. Prin intermediul panourilor fotovoltaice sunt generate tensiunea și curentul, care în model sunt reprezentate prin mărimile I_{pv} și V_{pv} . Ulterior, aceste mărimi sunt reglate pentru a avea valori optime pentru intrarea invertorului, prin intermediul convertorului continuu–continuu. [2], [7]. De asemenea centrala fotovoltaică analizată conține 23222 panouri fotovoltaice cu puterea de 0,545 kW, 54 de inverteoare cu puterea de 200 kVA, 4 transformatoare de 20/0,8 kV cu puterea de 2,5 MVA și 6142 m de linie electrică în cablu de 20 kV cu secțiunea de 300 mm².

Invertorul realizează conexiunea cu rețeaua electrică, asigurând conversia din curent continuu în curent alternativ. Comanda invertorului este de tip PWM unipolară, semnalul de comandă al tranzistoarelor fiind obținut prin compararea unui semnal de referință sinusoidal cu un semnal purtător triunghiular de frecvență mai mare decât cea a semnalului de referință [2], [5].

Transformatoarele și liniile electrice în cablu constituie elementele de racordare la rețeaua electrică de 20 kV. La ieșirea invertorului se regăsește o tensiune de 0,8 kV, care este ridicată de transformator la nivelul de 20 kV, pentru a permite racordarea la (SEN), iar linia electrică în cablu asigură transportul energiei electrice până la punctul de racordare [2].

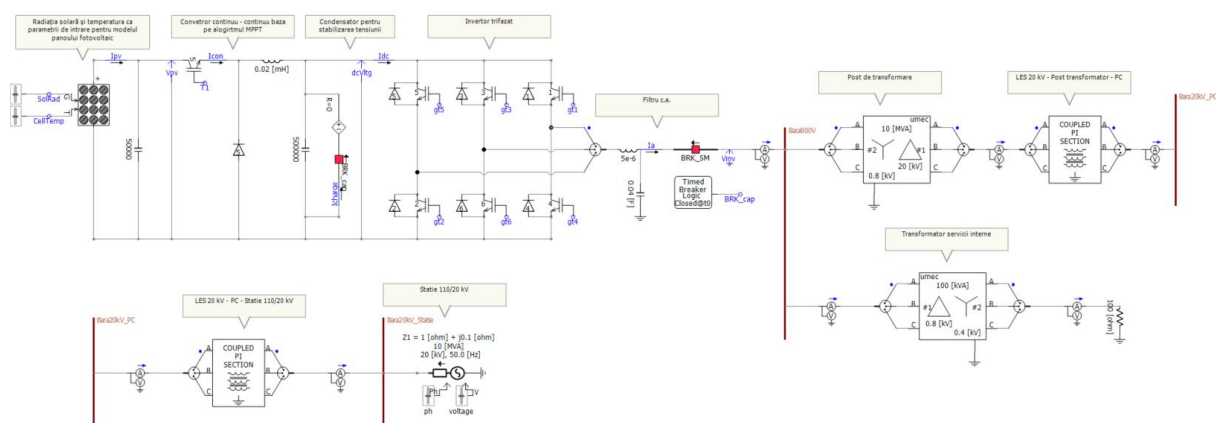


Fig. 1 – Modelul centralei fotovoltaice.

2.2 Reglajul puterii active și al puterii reactive

Pentru a determina diagrama P–Q, centrala trebuie să fie capabilă să regleze atât puterea activă, cât și puterea reactivă, acest lucru fiind realizat prin intermediul invertorului. În acest subcapitol este descris modul de comandă al invertorului și al convertorului continuu–continuu, care permite reglajul puterii active și al puterii reactive.

Pentru ca panourile fotovoltaice să producă putere maximă, este necesar ca iradianța solară și temperatura să aibă valori optime. Deoarece parametrii de intrare, iradianța solară și temperatura, pot varia, este necesară utilizarea unui algoritm care să determine punctul de funcționare la putere maximă (MPPT) pentru orice condiții inițiale impuse, așa cum se poate observa în Fig. 2. Pentru modelul propus este utilizată metoda conductanței incrementale pentru determinarea MPPT, deoarece aceasta prezintă o acuratețe ridicată în condiții de variație a iradianței solare. [2], [6].

De asemenea, în Fig. 2 se poate observa comanda convertorului continuu–continuu. Pe baza curentului și a tensiunii la ieșirea panourilor fotovoltaice, algoritmul MPPT determină tensiunea corespunzătoare punctului de putere maximă, V_{mppt} , care este utilizată ulterior ca tensiune de referință pentru convertorul continuu–continuu. Pe baza acestei referințe, un regulator PI și un semnal purtător triunghiular sunt utilizate pentru generarea semnalului de comandă al tranzistorului din cadrul convertorului continuu–continuu [6], [8].

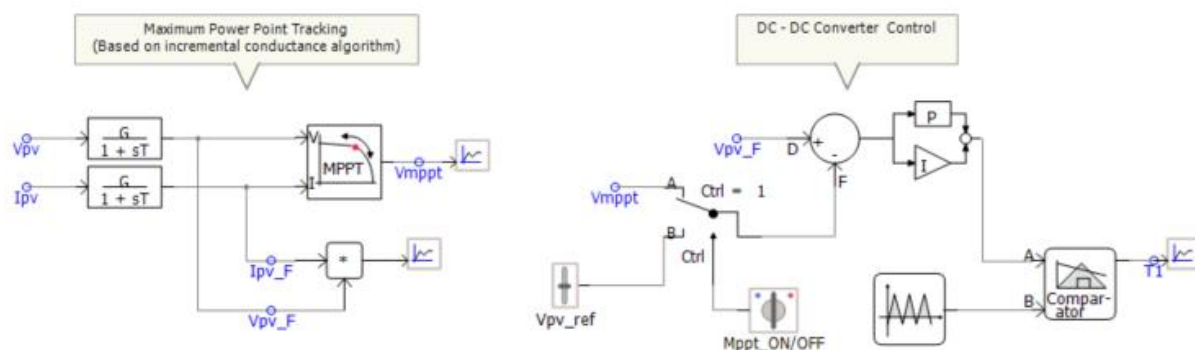


Fig. 2 – Comanda convertorului continuu-continuu.

În Fig. 3 este prezentată comanda cu modulație în lățimea impulsurilor (PWM) pentru inverterul trifazat. Unda de referință sinusoidală este comparată cu o undă purtătoare triunghiulară, de frecvență mai mare decât cea a undei de referință. Comanda este aplicată tranzistoarelor gt1, gt3 și gt5, iar pentru tranzistoarele gt4, gt6 și gt2 comanda este negată, astfel încât pe fiecare braț a inverterului să se afle în conducție un singur dispozitiv semiconductor [9], [10].

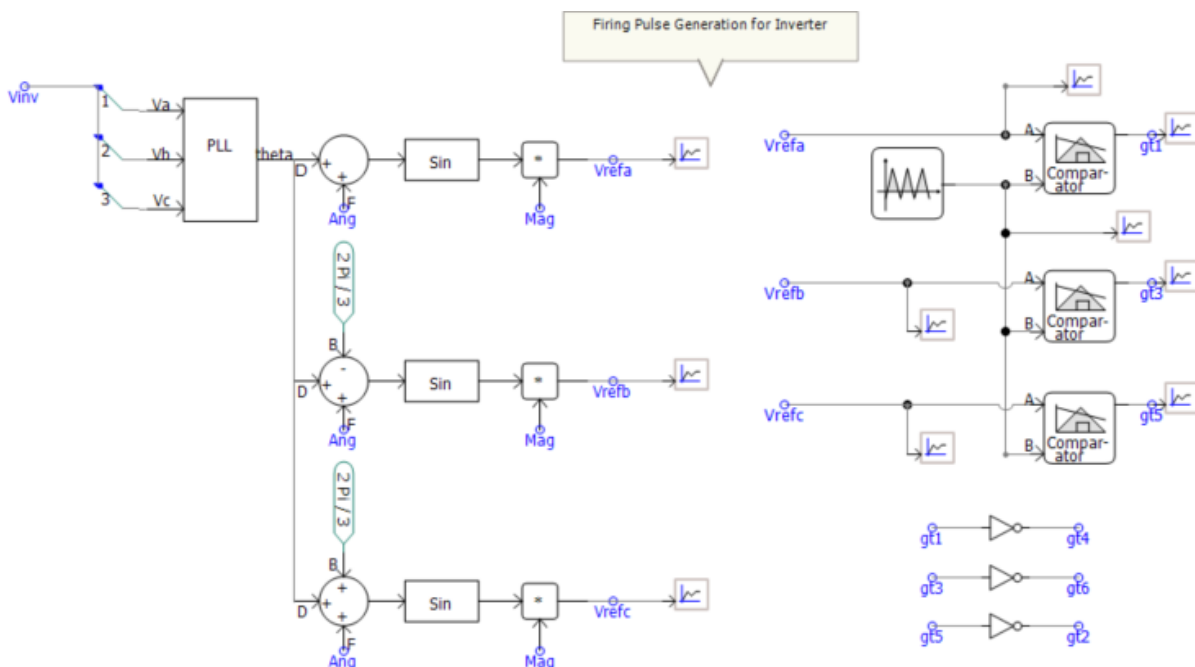


Fig. 3 – Comanda PWM inverter.

Practic, pe baza diferenței dintre tensiunea continuă de la intrarea inverterului și tensiunea de referință se determină o eroare, care este procesată de un regulator PI pentru a calcula unghiul de fază al tensiunii. În mod similar, pentru reglajul puterii reactive, diferența

dintre puterea reactivă impusă și cea măsurată este introdusă în regulatorul PI, rezultând amplitudinea tensiunii la ieșirea inverterului [11-13].

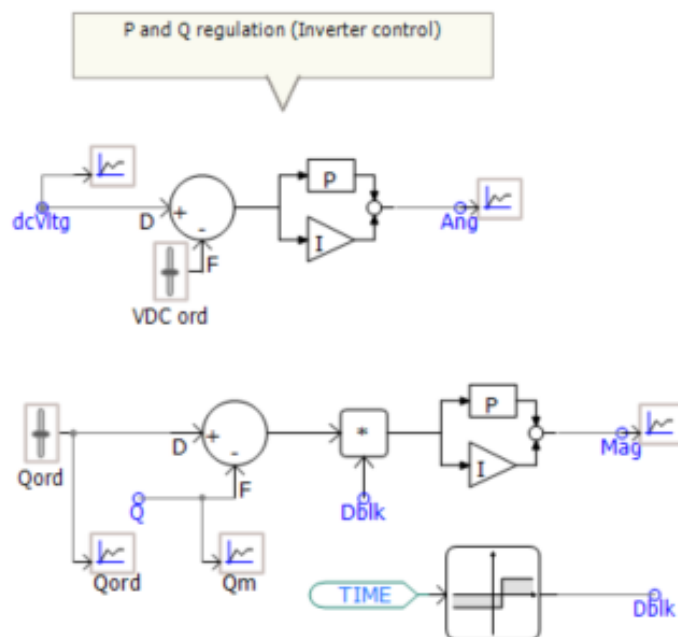


Fig. 4 – Reglarea puterii active și a puterii reactive.

În Fig. 5 și Fig. 6 este ilustrat modul de reglaj al puterii reactive și al puterii active. Puterea reactivă a fost reglată de la 0 MVar la 2 MVar, cu pasul de 1 MVar, iar puterea activă de la 10 MW la 5 MW, cu pasul de 2,5 MW.

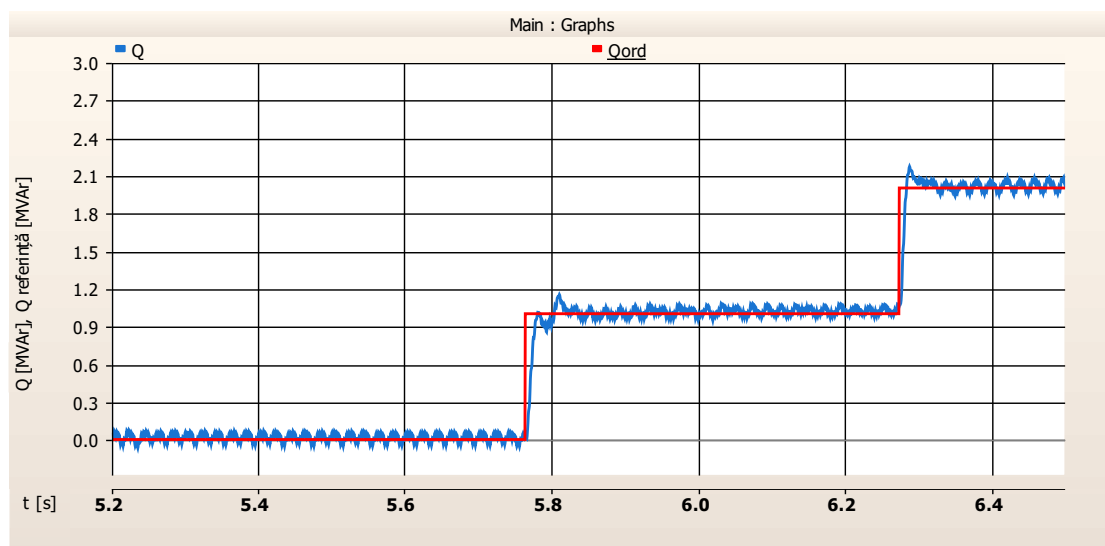


Fig. 5 – Reglajul puterii reactive.

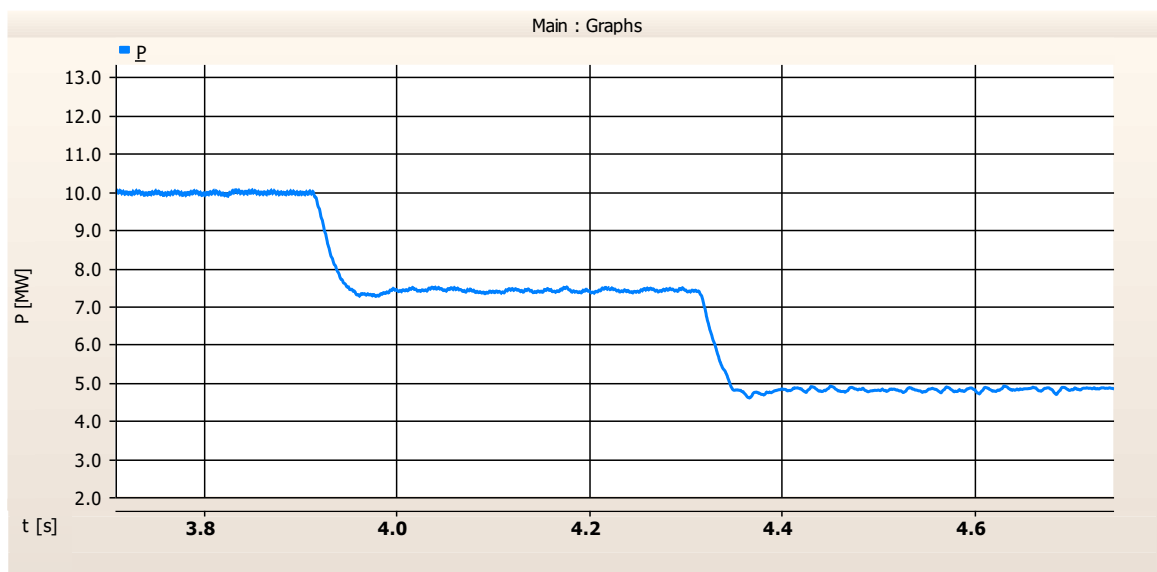


Fig. 6 – Reglajul puterii active.

3. ANALIZA REZULTATELOR

3.1 Rezultate obținute prin simulare

Pe baza diagramei de capabilitate P-Q pusă la dispoziție de către producător este realizată diagrama P-Q în punctul de conexiune la 20 kV. Diagrama invertoarelor se poate observa în Fig. 7.

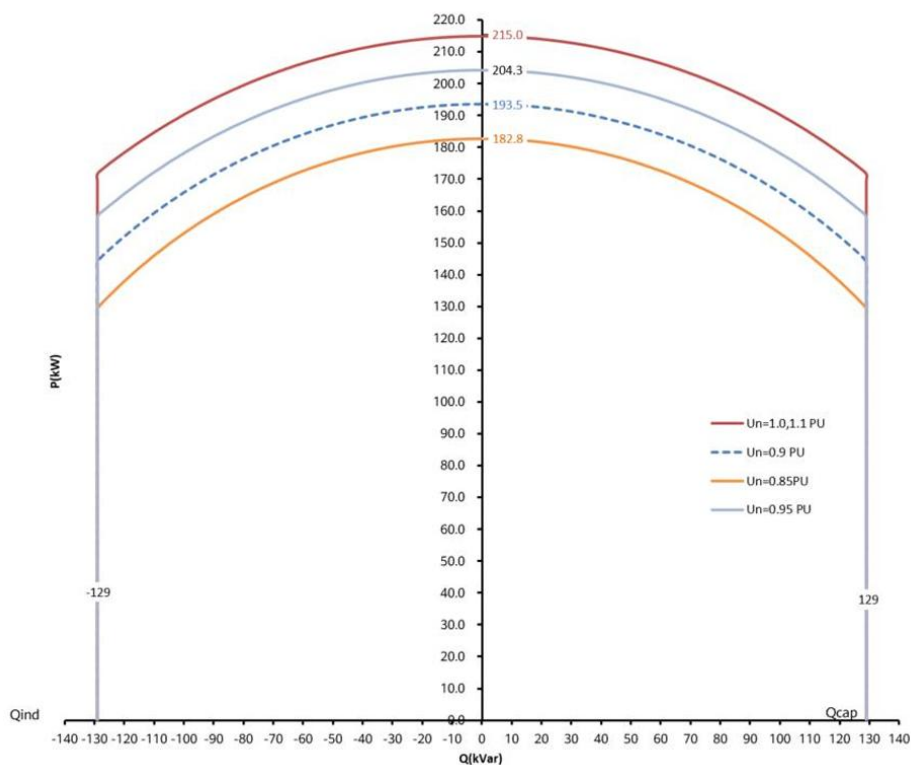


Fig. 7 – Digrama P-Q a inverterului.

Diagrama P–Q obținută prin simulare, așa cum se observă în Fig. 8., tinde să se încline spre partea stângă, deoarece, la valori ridicate ale puterii active, pierderile de putere activă generate de transformatoare, cresc semnificativ. De asemenea, se observă că la baza diagramei se află punctul în care puterea activă produsă este nulă, iar valoarea puterii reactive este de 0,296 MVar. Această valoare a puterii reactive este mai mică decât limita admisă de cerințele tehnice de racordare a centralelor electrice, de 0,5 MVar, de aici rezultă că nu sunt necesare mijloace suplimentare de compensare a puterii reactive [2], [3].

De asemenea pe lângă cerința legată de puterea reactivă, mai este o cerință de limitare la un factor de putere maxim de 0,9, atât în regim inductiv cât și în regim capacitive. În Fig. 8. se observă limitarea prin conturul cu linie punctată. În conformitate cu cerințele tehnice de racordare, centrala fotovoltaică poate să funcționeze numai în punctele din interiorul ariei delimitate de linia punctată [3].

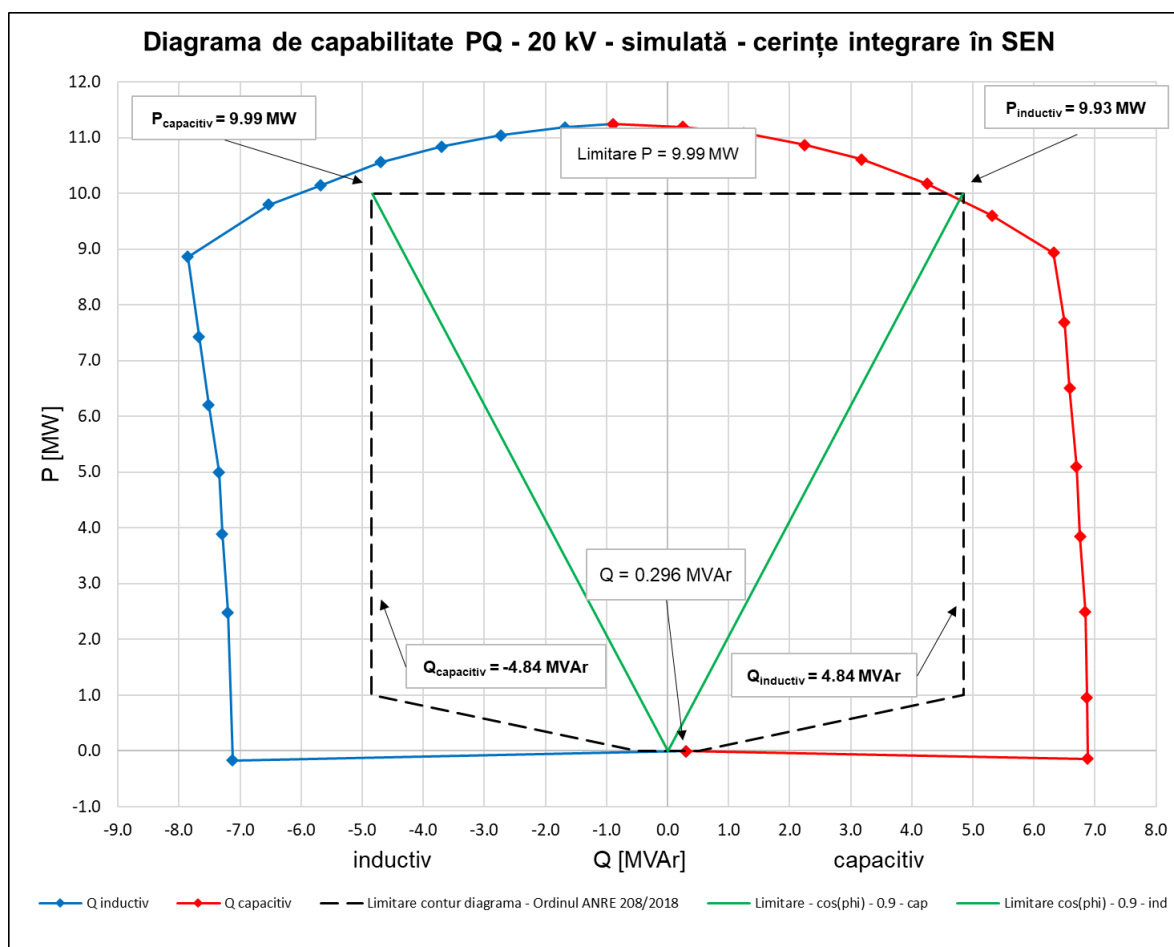


Fig. 8 – Diagrama P-Q în punctul de racordare.

3.2 Rezultate obținute prin măsurători

Măsurătorile au fost realizate în punctul de racordare, mai exact în celula de măsură de 20 kV, cum se poate observa în Fig. 9. a). Echipamentul folosit pentru achiziția datelor este compus dintr-o unitate centrală de achiziție de date de tip AOIP FD5, două module SINEAX DM5S și un modul SINEAX F534, cum se poate observa în Fig. 9. b). Modulele SINEAX preiau curenții și tensiunile de la transformatoarele de curent și tensiune, existente în celula de măsură, apoi sunt transformate în semnal unificat 4-20 mA. Și în final datele sunt achiziționate și stocate de unitatea centrală AOIP FD5. Mărimile achiziționate sunt următoarele: putere activă, putere reactivă, tensiunile de pe cele trei faze, frecvența și factorul de putere [14], [15].

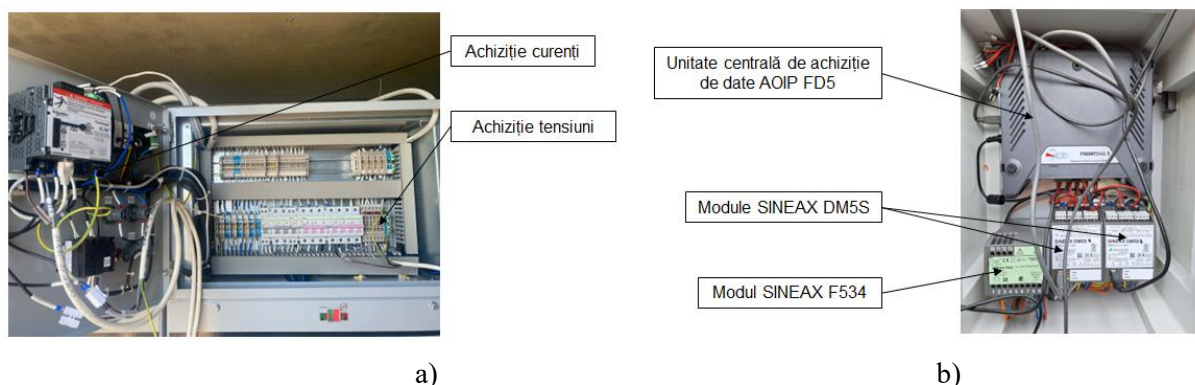


Fig. 9 – a) Celula de măsură 20 kV; b) Sistemul de achiziție de date.

Diagrama P-Q obținută prin măsurători are forma asemănătoare cu diagrama P-Q obținută prin simulări, dar la altă scară. Măsurătorile au fost realizate în luna septembrie a anului 2025, iar în perioada respectivă iradianța solară și temperatură nu au avut valori optime pentru a asigura o putere maximă la nivelul panourilor fotovoltaice. De asemenea în punctul în care puterea activă produsă este nulă, puterea reactivă are valoarea de 0.279 MVar. Această valoare este apropiată de valoarea obținută prin simulare.

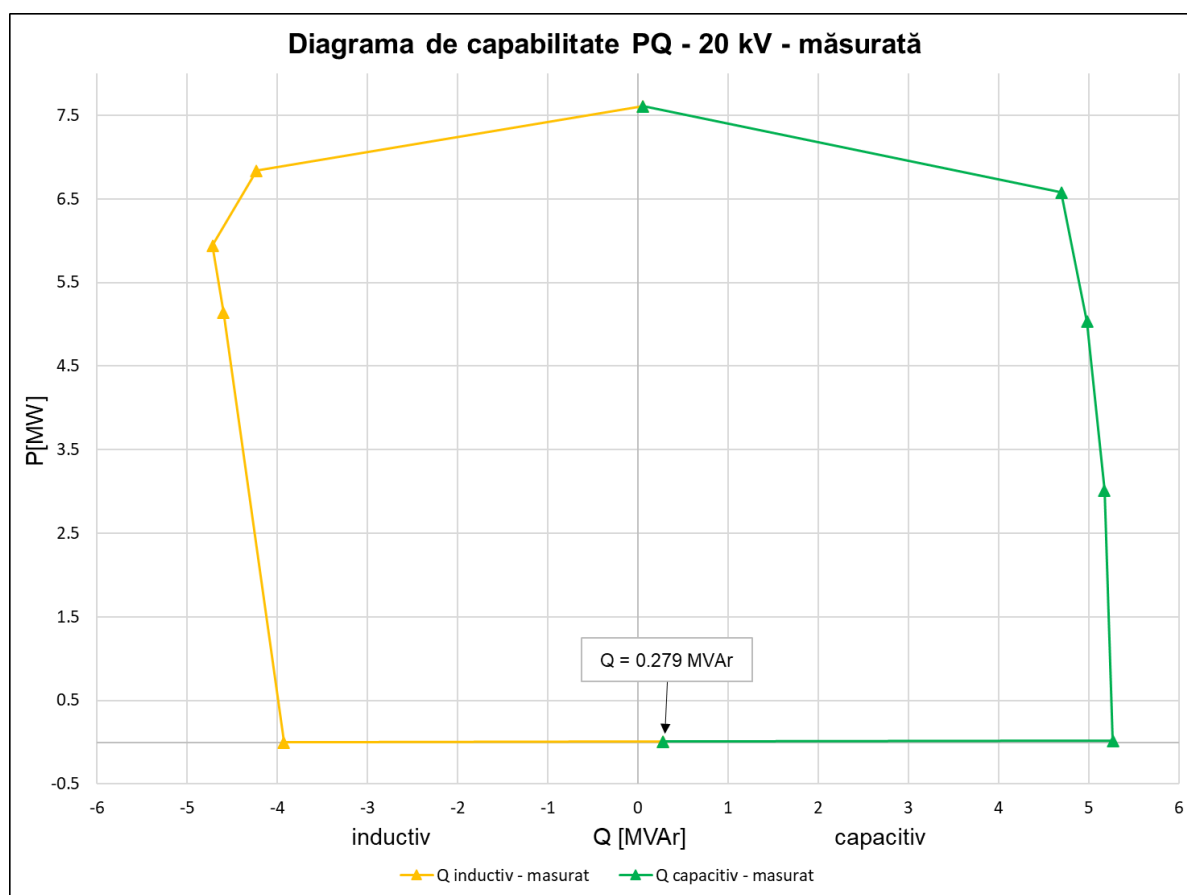


Fig. 10. – Diagrama P-Q obținută prin măsurători.

4. CONCLUZII

În cadrul acestui articol a fost prezentat un model pentru o centrală fotovoltaică cu puterea de 9,99 MW care permite reglajul puterii active și a puterii reactive. A fost determinată diagrama P-Q în punctul de racordare atât prin simulare cât și prin măsurători. Rezultatele sunt similare, de aici reiese că modelul propun prezintă o acuratețe mare în simularea comportamentului unei centrale fotovoltaice.

De asemenea pe baza diagramelor P-Q obținute în ambele module, a fost determinat faptul că centrale fotovoltaică este în conformitate cu normele tehnice de racordare ale centralelor electrice.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

BIBLIOGRAFIE

1. L.I. Dulau, D. Bica, K. Ronay, *Impact of photovoltaic power plants on power system losses*, 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania: IEEE, pp. 727–730, 2017, 7905015.N.R. Taylor, P.A. Taylor, *Automatic Load Seeking Load for a Motor*, US Patent No. 4,691,155.
2. B. Gorgan, S. Busoi, G. Tanasescu, P.V. Notingher, *PV plant modeling for power system integration using PSCAD software*, 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania: IEEE, pp. 753–758, May 2015.
3. *Ordinul nr. 208/14.12.2018 privind aprobarea Normei tehnice privind cerințele tehnice de racordare la rețelele electrice de interes public pentru module generatoare, centrale formate din module generatoare și centrale formate din module generatoare offshore*. 2018. Available: <https://portal.anre.ro/PublicLists/Ordin>
4. *Ordinul nr. 79/16.11.2016 privind aprobarea clasificării unităților generatoare și a centralelor electrice*. 2016. Available: <https://portal.anre.ro/PublicLists/Ordin>
5. M.H. Hairi, M.N. Kamarudin, M.K.M. Zambri, F. Hanaffi, A.A. Rahman, *Design and modelling of a three-phase grid-connected photovoltaic for low voltage network using PSCAD Software*, Int. J. Electr. Eng. Appl. Sci., **2**, 1, pp. 7–12, 2019.
6. V. Rallabandi, O.M. Akeyo, D.M. Ionel, *Modeling of a multi-megawatt grid connected PV system with integrated batteries*, IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 1146–1151, Birmingham, United Kingdom: IEEE, Nov. 2016.
7. X. Chen, Y. Li, J. Shi, J. Zhao, J. Huang, *Modelling of large-scale photovoltaic power generation system based on PSCAD and analysis of its stability*, J. Phys. Conf. Ser., **2488**, 1, p. 012031, May 2023.
8. O. Diouri, A. Gaga, S. Senhaji, M.O. Jamil, *Design and PIL test of high performance MPPT controller based on P&O-backstepping applied to DC-DC converter*, J. Robot. Control JRC, **3**, 4, pp. 431–438, Jul. 2022.
9. T. Ohnishi, H. Okitsu, *A novel PWM technique for three-phase inverter/converter*, IEEJ Trans. Power Energy, **105**, 2, pp. 176–183, 1985.
10. A. Rahman, Md.M. Rahman, Md.R. Islam, *Performance analysis of three phase inverters with different types of PWM techniques*, 2nd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE), Rajshahi: IEEE, pp. 1–4, Dec. 2017.
11. M.F. Schonardie, A. Ruseler, R.F. Coelho, D.C. Martins, *Three-phase grid-connected PV system with active and reactive power control using dq0 transformation*, 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON., pp. 1–6, Sao Paulo, Brazil: IEEE, Nov. 2010.
12. S.M. Basha, N.K., *Control of active and reactive power in grid-connected photovoltaic systems using QBC and dual three-phase inverter*, Int. J. Electr. Electron. Eng., **11**, 12, pp. 327–334, Dec. 2024.
13. A. Chaithanakulwat, N. Thungsuk, T. Savangboon, S. Boontua, P. Sardyoung, *Optimized D-Q vector control of single-phase grid-connected inverter for photovoltaic system*, J. Eur. Systèmes Autom., **54**, 1, pp. 45–54, Feb. 2021.
14. ****'Fast acquisition module, universal synchronized inputs & webserver - FD 5 / 10 / 15 - Data acquisition modules • AOIP'. Available: <https://www.aoip.com/product/data-acquisition-modules/fd-5-10-15-2/>
15. ****'SINEAX® DM5 - Camille Bauer Metrawatt AG'. Available: <https://camillebauer.com/en/product/sineax-dm5/>