

# CONTROLUL TENSIUNII ÎN REȚELELE DE MEDIE TENSIUNE ÎN CARE SUNT CONECTATE SURSE REGENERABILE DE ENERGIE

Andrei MARINESCU<sup>1</sup>, Mihai RĂDULESCU<sup>2</sup>, Nicolae GOLOVANOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Membru titular al Academiei de Științe Tehnice din România, <sup>2</sup> INDA Craiova,

<sup>3</sup> Membru titular al Academiei de Științe Tehnice din România

**Rezumat.** Larga dezvoltare a surselor regenerabile de energie conectate în rețelele de joasă și de medie tensiune, în special a surselor fotovoltaice impune dezvoltarea unor soluții specifice pentru controlul tensiunii în punctul de conectare a acestor surse de energie. Datorită caracterului specific al sursei solare, tensiunea în punctul de conectare, în special la conectarea pe liniile de medie sau joasă tensiune, poate prezenta variații importante și rapide, ceea ce ar putea conduce la daune importante pentru utilizatorii alimentați din linia respectivă. Pentru limitarea acestor efecte, normativele actuale impun conectarea instalațiilor fotovoltaice cu puteri instalate peste 5 MW direct la barele stației de medie tensiune iar pentru instalațiile de putere mai mică se impune efectuarea de calcule pentru cunoașterea variațiilor de tensiune determinate de variația puterii generate de sursă, astfel încât tensiunea în punctul de conectare să nu varieze cu mai mult de  $\pm 5\%$  față de tensiunea nominală. În cazul utilizatorilor cu receptoare sensibile, variația tensiunii determinată de volatilitatea surselor regenerabile nu este acceptabilă și trebuie analizate soluții pentru menținerea tensiunii în limite adecvate utilizatorului. În cadrul lucrării se propune o soluție de tipul UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*) pentru compensarea variațiilor de tensiune și asigurarea la bornele utilizatorilor cu receptoare sensibile a unei tensiuni setate practic constante. Studiul experimental efectuat pentru instalația dezvoltată a pus în evidență caracteristici corespunzătoare de răspuns atât în regim normal de funcționare precum și în regimuri perturbate. Sunt prezentate rezultate ale studiului experimental și sunt puse în evidență principalele caracteristici tehnice ale instalației realizate. Având în vedere faptul că variația tensiunii la bornele utilizatorilor finali, în scheme cu surse regenerabile de energie este imprevedibilă, utilizarea unui regulator automat de tensiune permite asigurarea condițiilor necesare de calitate a energiei pentru utilizatorii sensibili.

**Cuvinte cheie:** generare distribuită, variații de tensiune, regulator automat de tensiune.

**Abstract.** The expansion of renewable energy sources connected in low and medium voltage networks, especially of photovoltaic sources, requires the development of some specific solutions for the voltage control in the connection point of these energy sources. Due to the specific nature of the solar energy source, the voltage in the connection point, especially when connecting to medium and low voltage lines, can present significant and fast variations that could lead to significant damages to the users supplied from that line. To limit these effects, the present normative documents require connecting the photovoltaic installations with installed power over 5 MW directly to the medium voltage substation bars, and for lower power installations it is necessary to make calculations for finding the voltage variations caused by changes in the power generated by the source, so that the voltage in the connection point does not vary by more than  $\pm 5\%$  of the rated voltage. For users with sensitive receivers, the voltage variation determined by the volatility of renewable sources is not acceptable and solutions for keeping the voltage within limits suitable for the user should be analyzed. The paper proposes a solution of UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*) type to compensate the voltage variations and to provide an actually constant voltage at the terminals of the users with sensitive receivers. The experimental study performed for the developed installation emphasized good response characteristics both in normal and disturbed operating conditions. Results of the experimental study are presented and the main technical characteristics of the achieved installation are highlighted. Given that voltage variation at the terminals of end users in schemes with

renewable energy sources is unpredictable, the use of an automatic voltage regulator allows ensuring the necessary power quality conditions for sensitive users.

**Keywords:** distributed generation, voltage variation, automatic voltage regulator.

## 1. INTRODUCERE

Dezvoltarea instalațiilor de generare distribuită, de puteri relativ mici și conectate în rețelele de medie și joasă tensiune, impune analiza și rezolvarea problemelor care apar în punctul comun de conectare (PCC) cu rețeaua electrică publică. Sistemele de generare distribuită de tipul instalațiilor eoliene de mică putere sau a instalațiilor fotovoltaice pot determina importante perturbații în rețeaua electrică publică în special datorită caracterului puternic variabil al sursei de energie. În acest fel pot să rezulte variații mari ale tensiunii în PCC, determinând reducerea calității energiei electrice la utilizatorii conectați în rețea și uneori daune datorită valorilor ridicate ale tensiunii. Deși pot rezulta și alte perturbații: fluctuații de tensiune (efect de flicker), nesimetrii, regimuri nesinusoidale, prezenta lucrare are ca obiectiv elaborarea unei soluții practice pentru controlul automat al tensiunii la utilizatorii conectați la PCC.

Menținerea tensiunii în limitele impuse, în special în cazul utilizatorilor sensibili, poate avea o importanță deosebită pentru realizarea performanțelor proceselor care utilizează energia electrică.

Controlul automat al tensiunii în punctul de conectare prezintă un interes deosebit în cazul larg întâlnit al surselor de generare distribuită conectate în puncte situate pe liniile de distribuție a energiei electrice. În cele mai multe cazuri, controlul automat al tensiunii în punctul de conectare apare ca necesar la conectarea surselor regenerabile de energie bazate pe energie solară, care au în prezent o largă dezvoltare.

Conectarea surselor de generare distribuită direct în stațiile de transformare la barele de medie tensiune, pentru instalații de puteri mai mari (peste 3 MW) prezintă alte probleme care nu sunt analizate în cadrul lucrării.

## 2. CONECTAREA SURSELOR DISTRIBUITE PE LINIILE ELECTRICE

În figura 1 este prezentat cazul obișnuit în care o instalație fotoelectrică este conectată la o linie de medie tensiune. Dacă se consideră că tensiunea la barele stației de 20 kV rămâne practic constantă și se are în vedere variabilitatea puterii generate de sursa fotovoltaică (fig. 2), cu posibilitatea unor variații rapide de la puterea maximă la putere zero, este posibil ca în PCC să apară variații rapide de tensiune  $\Delta U_{PCC} = U_{\max} - U_{\min}$  care să depășească limite admise pentru utilizatorii conectați în rețeaua publică.

Problema apare în special în orele de încărcare redusă a rețelei de distribuție și producție maximă a sursei fotovoltaice (de exemplu, la ora prânzului într-o zi de sâmbătoare) atunci când este posibilă și circulația inversă a puterii pe linie, dinspre sursa fotovoltaică spre stația de transformare. Tensiunea în afara limitei superioare admise de tensiune poate conduce la daune receptoarelor sensibile conectate în rețea.

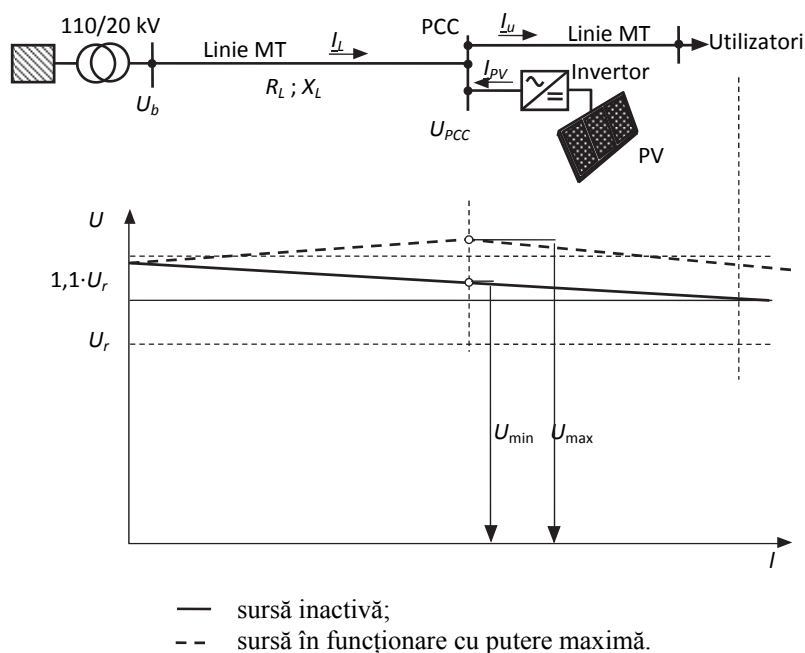
Datele din figura 2 pun în evidență faptul că variațiile mari și rapide ale puterii generate de sursele fotovoltaice pot determina variații importante ale tensiunii în punctul comun de conectare care nu pot fi controlate prin mijloacele actuale existente în rețelele de distribuție [1]. Tensiunea  $U_{PCC}$  în punctul de conectare rezultă din relația

$$U_{PCC} = U_b - \Delta U_L, \quad (1)$$

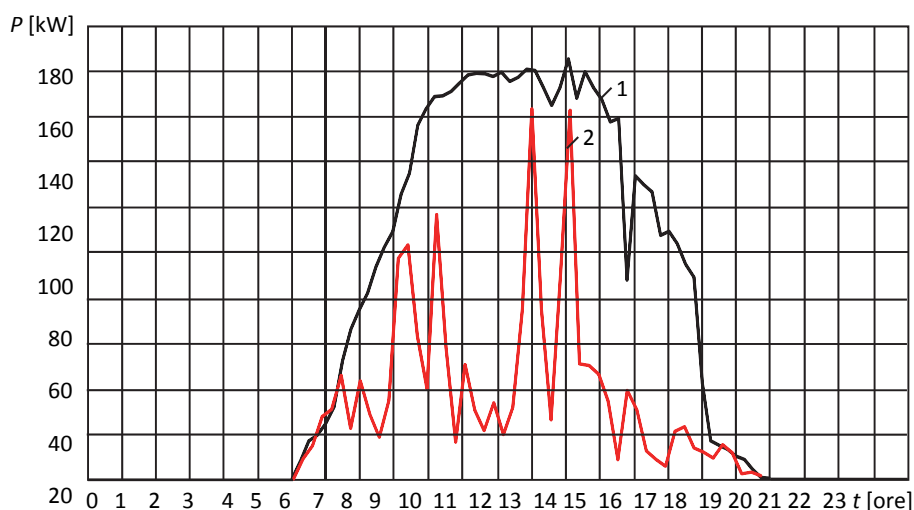
în care  $U_b$  este tensiunea la barele stației de transformare (considerată constantă) iar  $\Delta U_L$  este căderea de tensiune pe linia de MT dintre stație și PCC dată de relația:

$$\Delta U_L = \frac{S_L}{S_{sc}} \cdot \cos(\psi - \varphi), \quad (2)$$

în care  $S_L$  este puterea aparentă ( $S_L = P_L + jQ_L$ ) care circulă pe linia de MT;  $S_{sc}$  – puterea de scurtcircuit trifazată în PCC (se consideră că aportul la scurtcircuit al instalației fotovoltaice este nesemnificativ),  $\psi$  – unghiul liniei ( $\tan\psi=X_L/R_L$ );  $\varphi$  – unghiul de defazaj între tensiunea în  $U_{PCC}$  și curentul electric  $I_L$  pe linie (se consideră mărimi sinusoidale).



**Fig. 1.** Modificarea profilului de tensiune în lungul unei linii MT pe durata funcționării instalației fotovoltaice.



**Fig. 2.** Puterea generată de o instalație fotoelectrică într-o zi senină (1) și într-o zi cu nori (2).

Variația imprevizibilă a puterii transferate pe linia de MT în funcție de aportul sursei PV dar și în funcție de încărcarea variabilă datorată utilizatorilor conectați în rețea determină ca la bornele utilizatorilor să apară variații mari ale tensiunii care pot depăși limitele admise pentru receptoarele sale. Chiar dacă aceste variații de tensiune se încadrează în limitele admise ( $\pm 10\%$  din tensiunea nominală) [2] pentru unii utilizatori acestea pot fi inacceptabile.

În acest sens, sunt analizate soluții pentru limitarea variațiilor de tensiune din rețelele de distribuție în care sunt conectate surse regenerabile de energie.

Soluțiile actuale iau în considerație următoarele posibilități principale:

- modificarea adaptivă a tensiunii la barele de MT ale stației de transformare prin modificarea treptelor de reglaj ale transformatoarelor; lipsa unor sisteme rapide și automate de reglaj determină ca această soluție să fie utilizată numai pentru un reglaj grosier al tensiunii;

- reconfigurarea rețelei de distribuție prin modificarea schemei rețelei utilizând reclosere; soluția permite încadrarea în limitele admise ale tensiunii dar nu permite asigurarea exigențelor utilizatorilor cu receptoare sensibile;

- utilizarea UPS (*uninterruptible power supply*); soluție justificată economic pentru puteri relativ reduse;

- utilizarea instalațiilor UPQC (*Unified Power Quality Conditioners*) care includ un circuit DVR (*Dynamic Voltage Restorer*) și un circuit STATCOM (*Static Synchronous Compensator*); soluția permite controlul în timp real al formei curentului electric absorbit de utilizator și al tensiunilor în punctul în care este sunt montate, dar necesită justificarea economică în funcție de exigențele utilizatorilor sensibili [3, 4]

Schema de principiu a unei instalații UPQC este indicată în figura 3 [4]. Schema are rolul de a asigura corectarea formei curbei de curent electric  $i_r$  absorbit de utilizator prin introducerea de către convertorul paralel a unui curent electric  $i_f$  cu o formă astfel sintetizată încât curentul electric  $i_r$  să fie sinusoidal. Tensiunea  $U_f$  introdusă în serie cu tensiunea rețelei de către convertorul serie asigură realizarea unei valori constante a tensiunii de alimentare a utilizatorului.

În cadrul lucrării s-a dezvoltat o schemă simplificată care asigură controlul tensiunii la bornele utilizatorilor care au exigențe speciale privind nivelul tensiunii pe durata proceselor tehnologice.

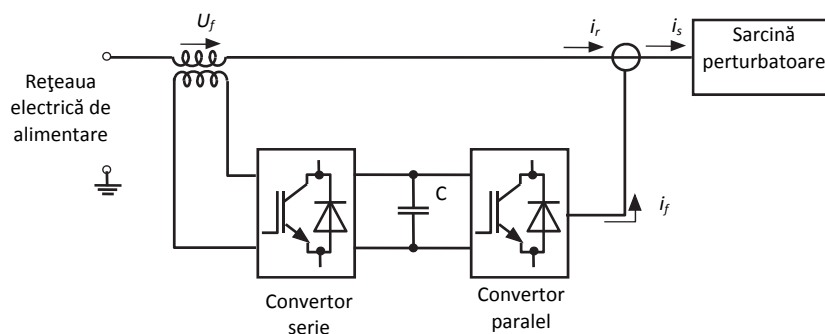


Fig. 3. Condiționar de rețea UPQC.

### 3. DESCRIEREA SCHEMEI PENTRU REGULATORUL AUTOMAT DE TENSIUNE

Sistemul dezvoltat și prezentat în cadrul lucrării este o variantă simplificată a unei scheme UPQC fiind destinat îmbunătățirii calității energiei electrice în rețelele de medie tensiune atât în regim

permanent (funcția de AVR – Automatic Voltage Restorer) cat și in regim tranzitoriu (funcția de DVR – Dynamic Voltage Restorer) care își propune sa conducă la:

- menținerea constantă a nivelului de tensiune la ieșire pentru creșteri/scăderi ale tensiunii de intrare în limite largi;
- compensarea perturbațiilor determinate de variațiile de tensiune și de întreruperile de scurtă durată;
- viteză ridicată de răspuns;
- randament ridicat;
- investiție inițială redusă.

Schema de principiu a regulatorului automat de tensiune realizat este indicată în figura 4.

Informația privind nivelul de tensiune în nodul PCC de conectare a utilizatorului este obținută de la un senzor de tensiune care uneori este chiar transformatorul  $T_a$  al cărui rol principal este alimentarea regulatorului. Tensiunea de ieșire a transformatorului este redresată de redresorul  $D$  care asigură încărcarea condensatorului  $C$  a cărei valoare este determinată de funcția de acumulator de energie pentru funcționarea inverterului  $Inv$  și mai puțin de funcția de filtrare a tensiunii redresate. Prin intermediul unui filtru trece jos LC tensiunea de ieșire a inverterului de tip PWM este aplicată la bornele secundare ale transformatorului de injecție  $T_s$  astfel încât la bornele utilizatorului să se asigure tensiunea dorită.

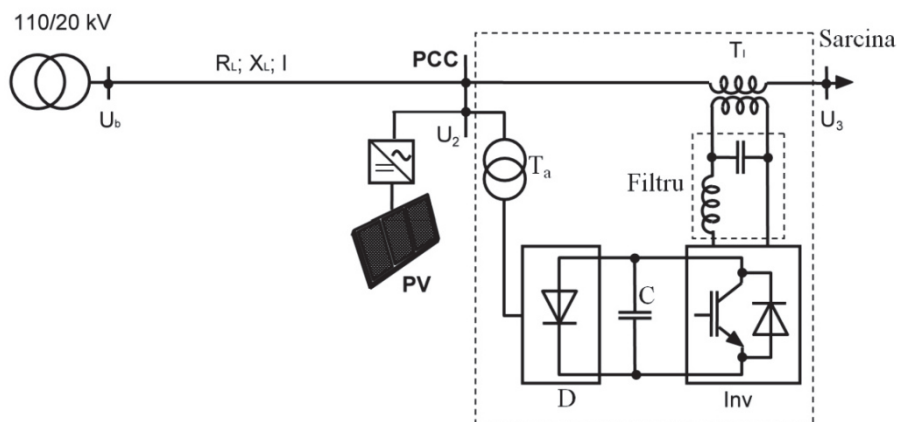


Fig. 4. Schema de principiu a regulatorului automat de tensiune (RT).

Pentru calculul circuitului s-a folosit schema echivalenta din figura 5, unde s-a notat cu  $U_b$  tensiunea de la barele de alimentare din rețeaua electrică,  $Z_L$  – impedanța liniei de alimentare,  $Z_{RT}$  – impedanța internă a regulatorului de tensiune,  $Z_s$  – impedanța de sarcină a utilizatorului și  $I_s$  – curentul electric absorbit de utilizator.

Conform acestei scheme pe durata funcționării regulatorului automat de tensiune trebuie îndeplinită relația:

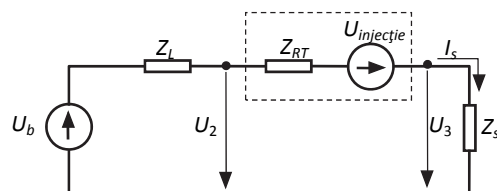


Fig. 5. Schema de calcul a regulatorului automat de tensiune.

$$U_3(t) = U_2(t) \pm U_{injecție}(t) \quad (3)$$

Regulatorul de tensiune conține trei unități prin care se asigură controlul independent al tensiunii pe cele trei faze astfel încât este posibilă realizarea unei alimentări simetrice a utilizatorilor trifazați sensibili la nesimetrie.

Condensatorul C (fig. 4) din circuitul intermediar de tensiune continuă (DC - Link) asigură posibilitatea compensării energiei golurilor de tensiune și a întreruperilor de scurtă durată. Dacă se cunosc valorile reprezentative ale adâncimii golurilor și a întreruperilor de scurtă durată condensatorul C poate fi dimensionat astfel încât aceste evenimente să fie limitate în domeniul admis al acestor perturbații electromagnetice.

La realizarea sistemului de reglaj al tensiunii există anumite elemente importante care trebuie luate în considerație.

Unul dintre acestea este amortizarea circuitului oscilant pe care îl formează filtrul LC de la ieșire împreună cu transformatorul de injecție, unde se preferă amortizarea activă prin software în locul amortizării clasice cu componente disipative.

Alt element este legat de protecția transformatorului de injecție care, datorită conectării în serie poate fi afectat de supracurenții de scurtcircuit și de supratensiunile care se propagă pe linia de medie tensiune. În acest scop s-a folosit pe partea de înaltă tensiune un circuit RC serie iar pe partea de joasă tensiune un limitator de tensiune cu varistoare.

Pentru a evita căderea de tensiune pe înfășurarea serie în regimul permanent fără surse regenerabile active și tensiune în PCC în limitele prescrise este posibil ca înfășurarea respectivă să fie scurtcircuitată printr-o comandă specială dată de software-ului de control al inverterului. Dacă pentru liniile de joasă tensiune comanda scurtcircuitului este simplă, în cazul liniilor de MT este necesară o comandă optică a acestuia care trebuie să aibă o sursă autonomă de alimentare (de exemplu, cu acumulator de energie reîncărcabil de la linia respectivă).

În sfârșit o importanță majoră o are strategia de control a inverterului care determină comportarea sistemului în toate regimurile de funcționare, inclusiv viteza de răspuns la perturbații statice și dinamice dar și randamentul global al instalației.

Alegerea unui algoritm adecvat de control este, ca de obicei, partea cea mai importantă și în dezvoltarea acestui sistem. Există numeroși algoritmi de control și soluția aleasă, conducerea după valoarea de vârf a tensiunii este primul pas în faza actuală de dezvoltare unde a primat eficiența economică.

Având în vedere impredictibilitatea surselor regenerabile de energie și a variației în limite largi și cu viteză mare de variație a puterii generate, regulatorul de tensiune trebuie să asigure compensarea tensiunilor reduse, limitarea supratensiunilor și trebuie să aibă o dinamică corespunzătoare.

Principalele caracteristici ale regulatorului de tensiune realizat sunt următoarele:

- asigură menținerea constantă a nivelului de tensiune la ieșire pentru abateri ale tensiunii de intrare în limite largi de până la  $\pm 50\%$ , în regim permanent;
- permite funcționarea ca ridicător sau coborâtor de tensiune;
- permite eliminarea nesimetriilor prin reglarea independentă a tensiunii pe cele trei faze;
- asigură compensarea perturbațiilor determinate de creșterile/golurile de tensiune și de întreruperile de scurtă durată;
- oferă o viteză ridicată a răspunsului la variații ale tensiunii în PCC;
- are un randament ridicat (peste 90%) dependent de puterea nominală injectată a echipamentului;
- investiție inițială este redusă, cu recuperarea în timp scurt a acesteia.

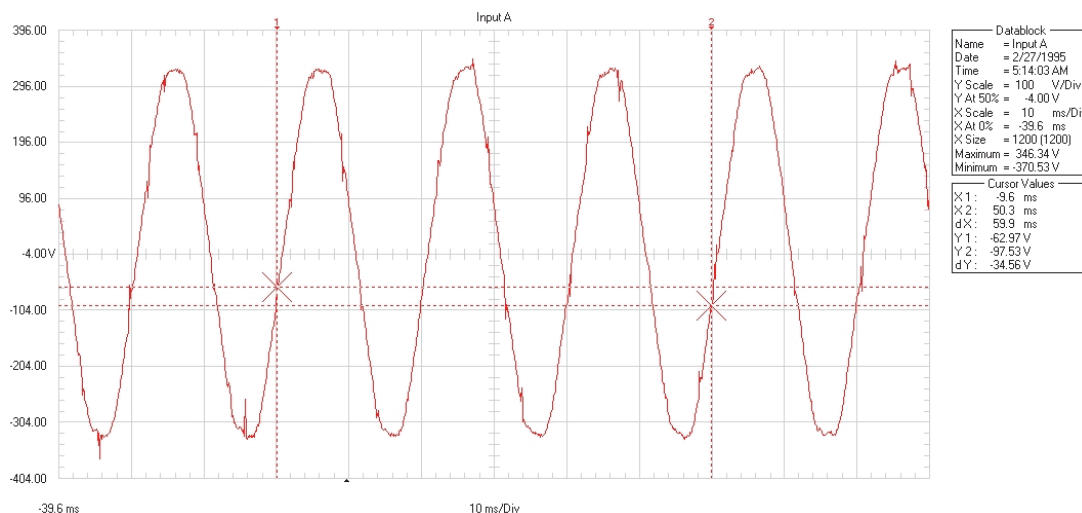
#### 4. REZULTATE EXPERIMENTALE

Studiile experimentale în laborator au fost efectuate pentru verificarea conceptului într-o rețea de joasă tensiune pentru sarcini cu diferite caracteristici și diferite valori  $U_2$  ale tensiunii din PCC. A

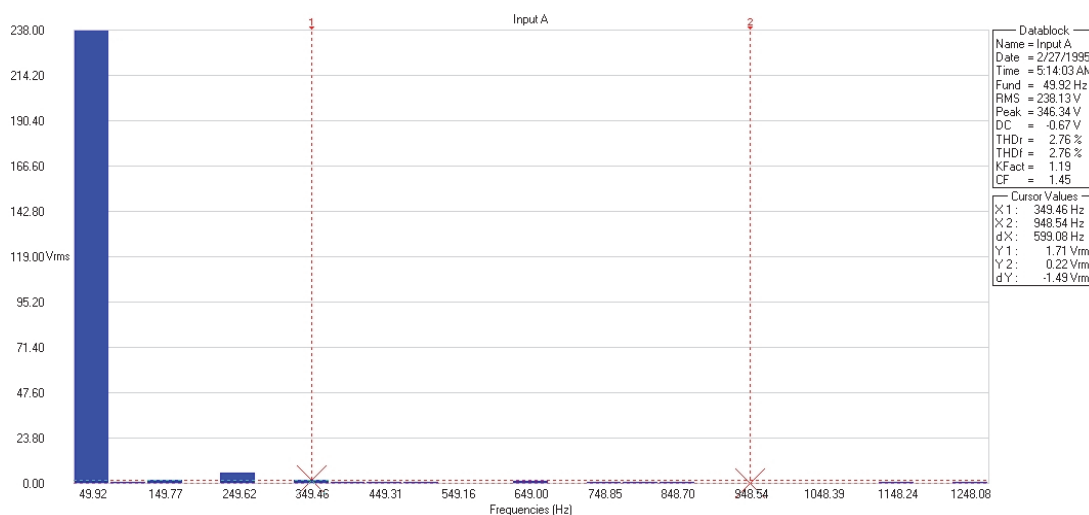
rezultat un răspuns corespunzător atât din punct de vedere al tensiunii rezultate  $U_3$  la bornele utilizatorilor finali cât și din punct de vedere al formei acestei tensiuni. În acest sens, în figura 6 este indicată oscilograma tensiunii la ieșirea echipamentului precum și spectrul de frecvență al acesteia. Se observă faptul că echipamentul asigură o tensiune în limitele valorilor acceptate pentru utilizatorii de joasă tensiune, iar tensiunea transmisă nu suferă o distorsiune suplimentară față de tensiunea de alimentare, în condițiile unui utilizator cu un factor de putere destul de redus.

Studiile efectuate pentru un domeniu larg de variație al sarcinii alimentate au indicat realizarea condițiilor privind atât nivelul tensiunii obținute cât și forma acesteia.

Analiza efectuată pentru determinarea vitezei de răspuns la modificarea tensiunii din rețeaua electrică de alimentare a pus în evidență posibilitatea realizării unor valori de până la 350 V/s.



a)



b)

**Fig. 6.** Forma tensiunii la ieșirea echipamentului ( $U_2 = 217$  V;  $U_3 = 238$  V) funcționând cu o sarcină  $I = 22$  A, cu un factor de putere  $PF = 0,55$  (a) și spectrul armonic al tensiunii realizate (b).

Ca exemplu, în figura 7 este indicat răspunsul echipamentului la o variație treaptă a tensiunii din rețeaua electrică de alimentare de la valoarea de 220 V la valoarea de 160 V pe durata a 10 perioade (200 ms). Căderea de tensiune treaptă s-a realizat prin scurtcircuitarea unui rezistor cu un contactor static controlat electronic la nivel de perioadă. Analiza datelor din figura 8 indică faptul că în circa 2 perioade (40 ms) ale tensiunii de alimentare, tensiunea la ieșirea echipamentului a atins tensiunea setată de 220 V, urmând un regim tranzitoriu cu stabilizare după circa 10 perioade ale tensiunii de alimentare.

Se observă faptul că sistemul de reglaj al tensiunii se comportă similar la scăderea și la creșterea tensiunii. Pentru evitarea supracreșterilor la revenirea tensiunii de alimentare este în curs de dezvoltare un nou algoritm de comandă care ține seama de semnul gradientului de tensiune.

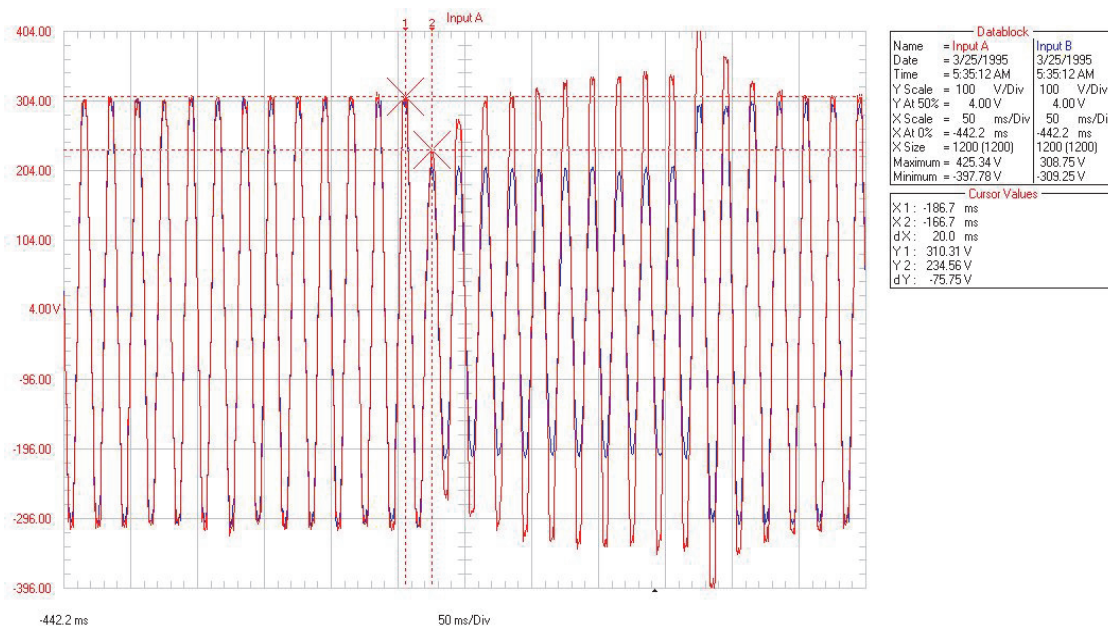


Fig. 7. Răspunsul echipamentului la o variație treaptă de tensiune,  $DU = 60 \text{ V}$ ,  $0,2 \text{ s}$ .

## 5. CONCLUZII

Lucrarea prezintă rezultatele cercetării pentru dezvoltarea unui regulator automat de tensiune pentru rețelele electrice de medie dar și de joasă tensiune, eficient în zonele în care tensiunea la bornele receptoarelor ajunge în afara benzii de tensiune admise datorită căderii de tensiune pe linia de alimentare, datorită aportului variabil al surselor regenerabile de energie sau atunci când receptoarele electrice sensibile necesită menținerea tensiunii în limite mai strânse decât cele adoptate pentru receptoarele standard.

Echipamentul static dezvoltat este o schemă simplificată a unui sistem UPQC pentru controlul calității energiei electrice aplicabil atât la utilizatori publici cât și la cei industriali. El este caracterizat printr-o mentenanță redusă și un randament ridicat.

Rezultatele studiului experimental efectuat pe un prototip complet funcțional cu puterea de injecție de 20 kVA indică eficiența echipamentului și asigurarea tensiunii în limite prestabilite, indiferent de nivelul tensiunii de alimentare atât în regim permanent cât și în regim tranzitoriu.

Echipamentul asigură controlul independent al tensiunilor în rețele trifazate care alimentează utilizatori monofazați.



Puterea echipamentului este proporțională cu variația de tensiune necesar a fi compensată și nu există limitări în aplicarea tehnicii descrise pentru puteri de injecție mult mai mari.

O varianta simplificată a acestui echipament permite menținerea tensiunii la comunități rurale amplasate la capătul unor rețele lungi de JT.

Creșterea calității energiei electrice la utilizatori implică și asumarea unor costuri suplimentare care, în cadrul soluției prezentate, sunt ușor recuperabile de către aceștia.

### **Bibliografie**

- [1] Kawahara K.ș.a., *Development of voltage regulation method considering mutual smoothing effect of PV in power distribution system*, CIRED 2013, Stockholm, rap. 1273
- [2] \*\*\* *Caracteristici ale tensiunii în rețelele electrice publice de distribuție*, SR EN 50160/2011.
- [3] \*\*\* *EMC- Part 2-14: Environment-Overvoltages on public electricity distribution networks*, Par 5.5 *Dispersed Generation*, IEC-TR 61000-2-14: 2006, ed. 1,
- [4] Naderi E., Tarafdar Hagh M., Zare K., *Determination on the performance of the distribution static compensator (D-STATCOM) in distribution network*, CIRED 2013, Stockholm, rap. 1147.