



Conferințele tehnico-științifice  
ENERGIE, EFICIENȚĂ, ECOLOGIE ȘI EDUCAȚIE  
Ediția a-VIIa  
INSTALAȚII PENTRU CONSTRUCȚII ȘI ECONOMIA DE ENERGIE  
Ediția a-XXXIVa  
4-5 iulie 2024, CHIȘINĂU, REPUBLICA MOLDOVA



## SIMULAREA REGIMULUI DE FUNCȚIONARE A UNUI INVERTOR

VASILE BAHRIN

### **Rezumat**

*Se evidențiază aspecte legate de simularea în mediul software ATP-EMTP (Alternative Transients Program) a invertoarelor.*

*Sunt abordate elemente de simulare a regimului de funcționare a unui invertor în tehnică PWM (Pulse Width Modulation-modularea lărgimii pulsului).*

### **1. Introducere**

Invertoarele sunt utilizate frecvent în sistemele care generează energie electrică, precum și de alimentare a unor utilități, locuințe sau diferite echipamente independente. Invertorul face conectarea dintre partea de producție (turbină eoliană, panou fotovoltaic), partea de stocare (baterii de acumulatori) și partea de descărcare a energiei electrice (consumatorii de curent alternativ). În cazul când funcționarea rețelei de distribuție (din sistemul de energie regenerabilă sau din sistemul hibrid) este afectată, invertorul trebuie să detecteze cauzele și să nu contribuie la amplificarea lor.

Pentru un invertor este foarte importantă forma de undă a tensiunii alternative la ieșire. La alimentarea unor sarcini cu caracter rezistiv (iluminat cu becuri de incandescență, încălzire rezistivă), forma de undă poate fi și sinusoidă modificată. Însă, alimentarea aparaturii care

înglobează sisteme electronice complexe (televizor, computer etc) necesită o formă de undă a tensiunii cât mai apropiată de forma de sinusoidă pură.

Forma de undă la ieșirea din invertor, chiar și în cazul invertoarelor cu undă sinusoidă pură, este de fapt o cvasisinusoidă. Forma sinusoidală a tensiunii de ieșire este generată prin modelarea semnalului dreptunghiular al tensiunii.

## **2. Modelarea și simularea în mediul software ATP - EMTP**

Programul ATP-EMTP (Alternative Transients Program) este utilizat pentru simularea numerică a fenomenelor tranzitorii de natură electromagnetică și electromecanică din sistemele electroenergetice și înglobează modele pentru mașini rotative, transformatoare, rețele și cabluri electrice. Acest program poate simula rețele complexe cu structură arbitrară, sau perturbații simetrice și nesimetrice (defecte, lovituri de trăsnet, comutația diodelor și a tiristoarelor); programul facilitează analiza sistemelor de control, a componentelor electronice de putere, cât și a echipamentelor cu caracteristici neliniare.

Sistemul ATP include următoarele componente:

- elemente bloc, cuplate sau necuplate liniar;
- rețele și cabluri electrice cu parametri distribuiți sau care depind de frecvență;
- elemente cu neliniarități: transformatoare la care se consideră saturația și histerezisul magnetic, descărcătoare, arc electric;
- comutații (dependente de timp sau de tensiune, statistica comutațiilor);
- diode și tiristoare;
- mașini sincrone trifazate, mașini universale;
- MODELS și TACS (Transient Analysis of Control Systems).

EMTP (Electromagnetic Transient Program) a fost conceput pentru analiza sistemelor energetice, dar poate fi utilizat și la circuitele electronice. Acest software poate analiza orice rețea care conține interconectări între rezistențe, inductanțe, capacități, scheme în  $\pi$  mono sau multifazate, rețele cu parametri distribuiți și alte elemente.

Interfața ATPDraw este o interfață grafică al ATP-ului, în mediul MS-Window. Acest program realizează editarea interactivă a rețelei electrice care va fi simulată: utilizatorul concepe schema circuitului electric prin selectarea componentelor din meniuri, iar programul numerotează automat nodurile nespecificate și crează fișierul ATP în formatul corect.

### 3. Simularea regimului de funcționare a unui invertor în tehnică PWM

Modulația constituie un proces electric neliniar în care parametrii unui semnal (purtător) sunt modificați prin intermediul altui semnal (modulator, informație); pentru modulația în lățime de impuls amplitudinea, frecvența și faza semnalului original rămân neschimbate.

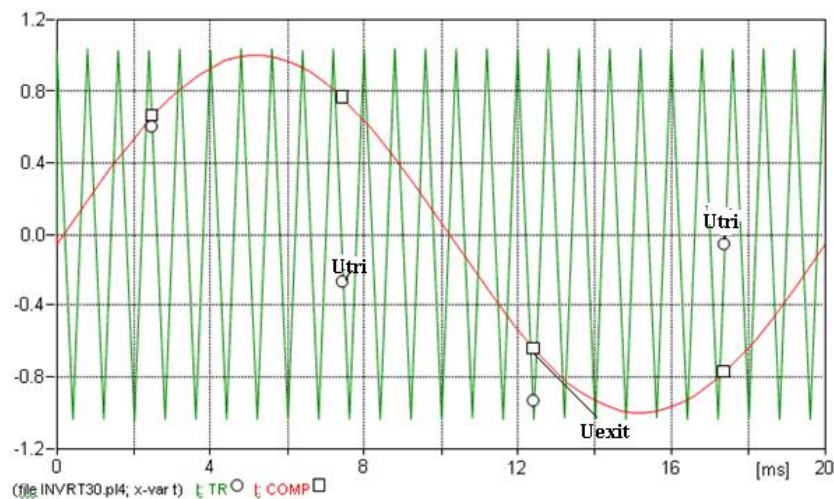
Tehnica PWM (Pulse Width Modulation-modularea lărgimii pulsului) este bazată pe "mărirea" și "micșorarea" unei lungimi de undă pentru a controla intrarea/ieșirea semnalului.

Metodele de modulare PWM pot realiza următoarele obiective:

- lărgirea lățimii benzii liniare de modulație;
- micșorarea pierderilor la comutarea dispozitivelor de putere;
- minimizarea distorsionării armonicilor totale din spectrul comutării formei de undă;
- minimizarea timpului de calcul și implementarea facilă.

Metodele PWM sunt folosite, frecvent, în electronica de putere; tehnicile de comandă PWM oferă posibilitatea reglării în invertor atât a tensiunii, cât și a frecvenței tensiunii de ieșire. Dezvoltarea tehnicii de calcul și a circuitelor specializate pentru calculul matricial a determinat renunțarea la metodele de modulare analogice în favoarea celor digitale. Injectarea unor armonici în semnalul sinusoidal pentru invertorul trifazat a condus la folosirea modulației PWM cu undă nesinusoidală; spre deosebire de semnalul sinusoidal trifazat PWM, semnalul nesinusoidal trifazat PWM poate mări banda liniară de modulație pentru tensiunea de linie.

Cea mai utilizată tehnică PWM este cea sinusoidală; forma de undă a acestui invertor este prezentată în Fig. 1.



**Fig. 1.** Forma de undă a invertorului PWM sinusoidal cu tensiunea comutată bipolară de ieșire.

Semnalele de comandă sunt generate comparând o undă triunghiulară,  $u_{tri}(t)$ , având amplitudinea  $U_{tri}$  și frecvența  $f_{tri}$ , cu o undă de referință sinusoidală,  $u_{sin}(t)$ , de amplitudine  $U_{exit}$  și frecvență  $f_{exit}$ . Frecvența undei de referință este egală cu frecvența dorită a tensiunii alternative de la ieșirea inverterului, iar amplitudinea undei de referință este direct legată de valoarea efectivă a fundamentalei tensiunii de la ieșirea inverterului.

Parametrii prin care se caracterizează o tehnică PWM sunt:

- raportul de modulare în frecvență:  $k_f = \frac{f_{tri}}{f_{exit}}$ ,  $f_{tri} = k_f \cdot f_{exit}$ ,  $f_{exit} = 50\text{Hz}$ ;

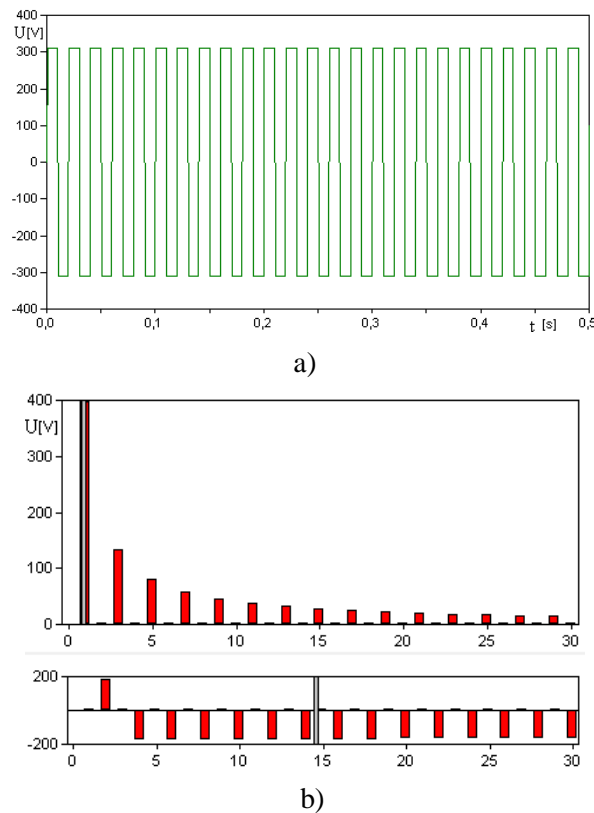
- raportul de modulare în amplitudine:  $k_a = \frac{u_{exit}}{u_{tri}}$ ,  $u_{exit}$  fiind valoarea de vârf a tensiunii.

La simularea EMTP, pentru  $f_{exit} = 50\text{Hz}$ , raportul de modulare în frecvență este  $k_f = 15$ , iar

raportul de modulare în amplitudine este  $k_a = \frac{u_{exit\max}}{u_{tri\max}} = 0,8$ .

Se consideră că inverterul alimentează un circuit de sarcină R-L-C.

Rezultatele simulării în EMTP ale tensiunii de ieșire sunt prezentate în Fig. 2.



**Fig. 2.** Inverter PWM sinusoidal cu tensiunea comutată bipolară:

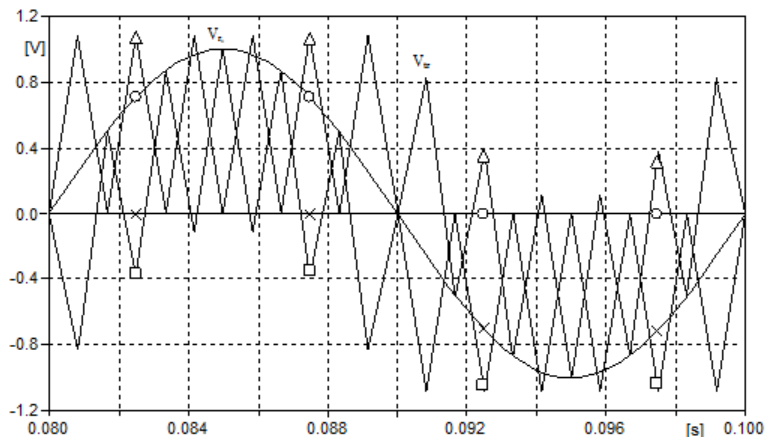
a) tensiunea simulată de ieșire; b) diagrama spectrală.

#### 4. Simularea regimului de funcționare a invertorului PWM în punte cu tensiunea comutată unipolară

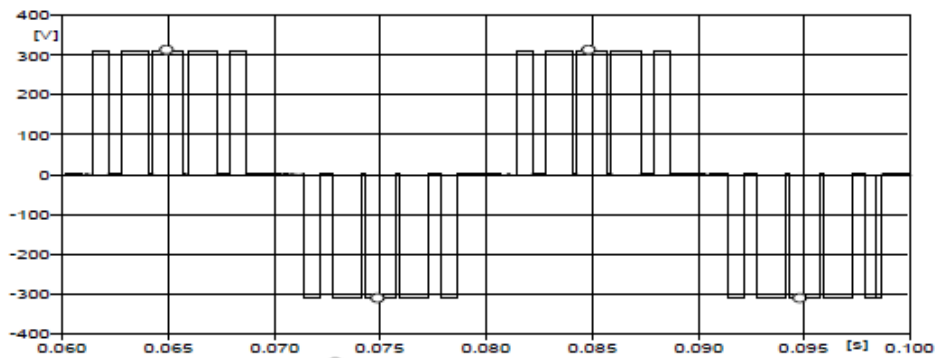
Spre deosebire de tehnica anterioară, în cazul tehnicii PWM sinusoidale cu tensiunea comutată de ieșire unipolară nu se mai comută toate dispozitivele de putere. În procesul de formare a semnalelor de comandă intervin două unde triunghiulare; în alternanța pozitivă a unei de referință,  $v_r$ , se folosesc undele triunghiulare  $V_{tr+}$ .

Principalul avantaj al comenzii PWM sinusoidale având tensiunea comutată de ieșire unipolară rezultă din numărul mai mic de comutații ale dispozitivelor de putere, deci pierderi de comutație mai reduse; conținutul în armonici a tensiunii de ieșire este comparabil cu cel de la tehnica PWM anterioară.

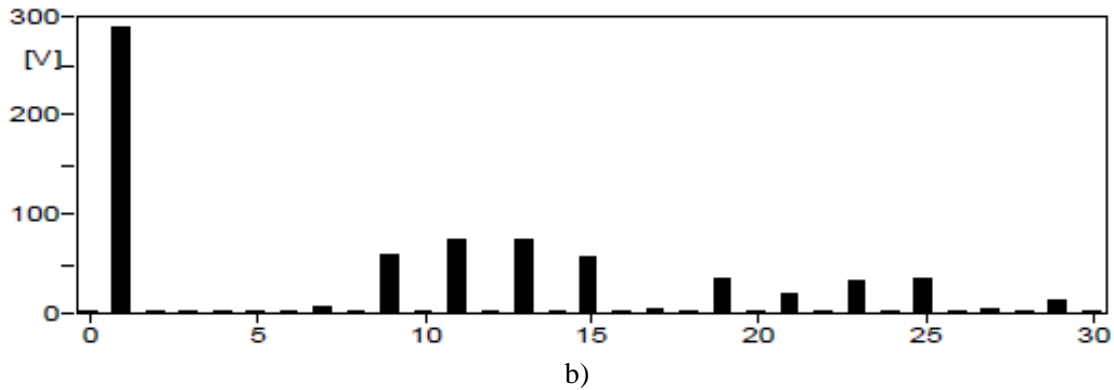
Forma de undă în acest caz este prezentată în Fig. 3.



**Fig. 3.** Forma de undă a invertorului PWM sinusoidal cu tensiunea comutată unipolară de ieșire. Forma de undă a tensiunii de ieșire și diagrama spectrală sunt prezentate în Fig. 4.



a)



**Fig. 4.** Simularea regimului de funcționare a inverterului PWM cu tensiunea comutată unipolară:  
a) tensiunea de ieșire; b) diagrama spectrală.

## 5. Concluzii

Calitatea energiei electrice furnizate (fiind vizată în special forma de undă a tensiunii) constituie un criteriu foarte important. Din acest motiv, inverterul trebuie să asigure o formă de undă a tensiunii de ieșire cât mai apropiată de forma de undă din rețeaua de distribuție, fără a introduce armonici în circuitele electrice.

Rezultatele simulărilor realizate în EMTP au confirmat faptul că inverterul PWM are forma de undă mult mai apropiată de forma sinusoidală, comparativ cu inverterul clasic, fără modelarea undei de tensiune; armonicile generate de inverterul PWM sunt mult atenuate, iar bruiajul introdus este mult mai mic.

În funcționarea inverterului PWM cu comutație simplă pierderile de comutație sunt reduse comparativ cu pierderile inverterului PWM cu comutație dublă.

## SIMULATION OF THE OPERATION REGIME OF AN INVERTER

### *Summary*

*Aspects related to the simulation in the ATP-EMTP (Alternative Transients Program) software environment of inverters are highlighted.*

*Elements for simulating the operating regime of an inverter in PWM PWM (Pulse Width Modulation) technique are addressed.*

## BIBLIOGRAFIE

[1]. Bahrin V. Considerații asupra funcționării invertoarelor din sistemele de energie regenerabilă. Conferința Știința modernă și energia, ed. 37, Cluj-Napoca, Mai 2018, pg.50-57.

[2]. Irimia F.D.: The experimental study of different operating regimes from DC/AC inverter. Conference EPE 2010, 28-30 octombrie 2010, Iași.

[3]. Baraboi A., Adam M., Popa S., Pancu C. Compatibilitatea electromagnetică. Surse de perturbații electromagnetice. Editura PIM, Iași, 2007.

[4]. Bostan I. ș.a.: Sisteme de conversie a energiilor regenerabile. Ed. "TEHNICA-Info", Chișinău, 2007.

[5]. Adam M., Baraboi A., Ciobanu R. Monitorizarea și diagnosticarea întrerupătoarelor de putere. Editura "Gh. Asachi", Iași, 2002.