

# Unele aspecte privind protecția și metoda de calcul a curenților de scurtcircuit în sistemele eoliene cu viteză variabilă

Macovei Ilie<sup>1</sup>, Gropa Victor<sup>2</sup> și Rujanschi Dumitru<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova;

<sup>2</sup> Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova;

<sup>3</sup> Î.S. Moldelectrica, Chișinău, Republica Moldova.

**Abstract** – În timpul de față are loc o extindere masivă a introducerii în exploatare a surselor alternative de energie, mai cu seamă a celor eoliene. Există proiecte și în Republica Moldova. Se utilizează preponderent turbine eoliene cu viteză variabilă (Variabil speed wind turbine, VSWT) utilizate cu generatoare asincrone cu dublă alimentare (DFIG), capabile să mențină frecvența constantă la diferite viteze ale vântului. Afară de aceasta turbinele eoliene cu DFIG permit extragerea maximă a energie vântului în întreg diapazonul de variație a vitezei și totodată reduce dimensionarea deci și costul convertoarelor până la 30% din puterea nominală a instalației. O altă proprietate importantă a DFIG este posibilitatea de a controla puterea activă și reactivă independent.

**Cuvinte cheie** – DFIG, scurtcircuit, Crowbar, metodă de calcul a scurtcircuitelor.

## 1. ASPECTE PRIVIND PROTECȚA SISTEMELOR CU DFIG DE LA CURENȚII DE SCURT-CIRCUIT

Racordarea parcurilor eoliene la sistemul energetic complică esențial funcționarea acestora. În regim de scurtcircuit în sistemul energetic cresc brusc curenții și scad tensiunile în instalații și că trebuie protejate de astfel de regimuri. Foarte sensibile la variațiile de curent sunt convertoarele, mai cu seamă cel din partea rotorului (Rotor Side Converter, RSC), de aceea peste 10ms după apariția scurtcircuitelor în circuitul rotoric sau statoric sau în ambele concomitent se introduc rezistențe active uneori programabile pentru diminuarea curenților de scurtcircuit. Aceste rezistențe se numesc “Crowbar”. Aceste rezistențe sunt introduse pe parcursul scurtcircuitului și scoase după amortizarea curenților rotorici și deci și statorici.

Instalația eoliană cu DFIG pe parcursul scurtcircuitelor poate fi deconectată sau poate rămâne conectată la rețea (în funcție de capacitatea rețelei de a suporta regimul de scurtcircuit – Grid Fault Ride through, GFRT). În primul caz crește durată re repunere a ei în funcție și riscul instabilității tensiunii.

Dacă în sistemul energetic există riscul instabilității tensiunii într-un anumit nod, atunci instalația eoliană

trebuie să rămână conectată la rețea pentru a restabili mai repede regimul normal de funcționare. Independent dacă instalația a rămas sau nu conectată la rețea, peste 10ms după scurtcircuit RSC se blochează iar la fazele rotorice se conectează Crowbar-ul.

După blocarea RSC, pe capacitatea C se acumulează energie din partea convertorului de la rețea (Grid Side Converter, GSC) și crește tensiunea. Pentru a proteja convertoarele de la supratensiune paralel cu capacitatea “C”, se conectează o rezistență comandată numită Chopper. Schema generală a unei instalații eoliene cu Crowbar și Chopper este prezentată în Fig. 1:

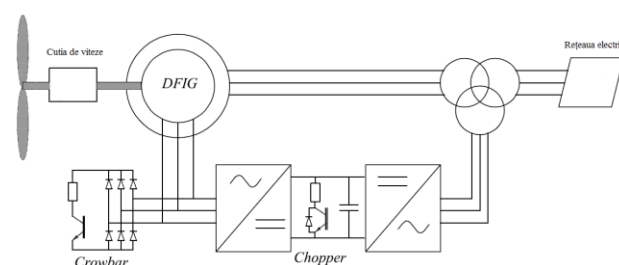


Fig. 1. Schema generală a instalației eoliene cu Crowbar și Chopper.

Crowbar-ul se numește pasiv dacă se scoate din circuit după lichidarea deranjamentului și micșorarea curentului până la 0. Dacă crowbar-ul se deconectează după lichidarea scurtcircuitului și revenirea curentului la valoarea prefault, atunci se numește activ.

Există mai multe tipuri de sisteme Crowbar: sisteme Crowbar convenționale, în serie, mixte, etc. Schema de principiu a Crowbar-ului este prezentată în fig. 1. În acest caz rezistența activă se conectează la înfășurarea rotorică după blocarea RSC și DFIG funcționează ca generator asincron simplu consumând multă putere reactivă din rețea și provocând pericol de instabilitate a tensiunii.

Introducerea crowbar în circuitul rotoric micșorează curentul rotoric și reduce turațiile turbinei eoliene. Schema principială a crowbar în serie este prezentată în Fig. 2. Crowbar în serie reprezintă trei rezistențe active conectate în circuitul statoric paralel cu un întrerupător în regim normal închis. La apariția unui scurtcircuit în sistem, întrerupătorul se declanșează introducând în

circuitul statoric o rezistență și micșorând curentul.

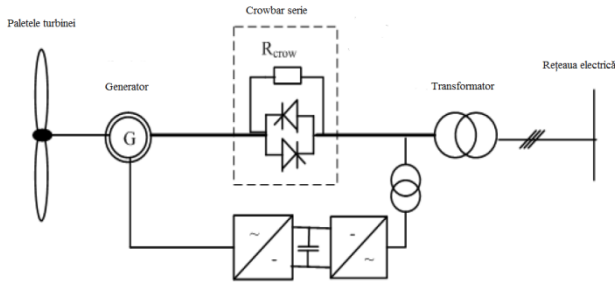


Fig. 2. Schema de principiu a Crowbar în serie.

Principiu de funcționare al unui Crowbar exterior, Fig. 3 este similar cu cel conectat în serie, efectul fiind deosebit. Testările pe un model concret au arătat că la utilizarea unui crowbar convențional, creșterea curentului depășește 12 unități nominale, iar la utilizarea Crowbar-ului în serie, scade până la 0,2 unități pe parcursul scurtcircuitului.

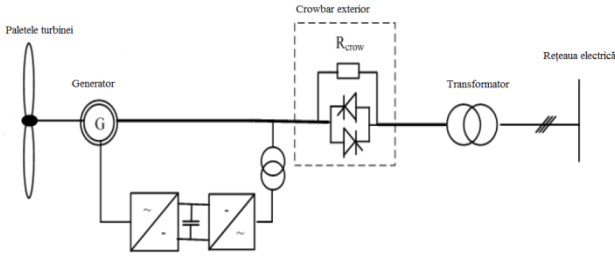


Fig.3. Schema principală a unui Crowbar exterior.

Pentru a estima influența Crowbar-ului asupra regimului sistemului energetic, se va analiza succint o metodă de calcul a curenților de scurtcircuit pe parcursul regimului tranzitoriu în generatorul DFIG cu crowbar activat.

După blocarea RSC și introducerea Crowbar-ului, generatorul DFIG se transformă într-un generator asincron obișnuit cu rotorul scurtcircuitat (Squirrel Cage Induction Generator, SCIG), Fig. 4.

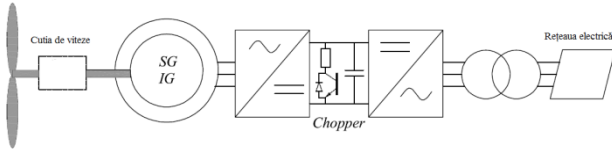


Fig. 4. Schema DFIG ca generator asincron.

## 2. CALCULUL CURENȚILOR DE SCURT-CIRCUIT LA BORNELE DFIG CU CROWBAR

Metoda de calcul a curenților de s.c. da bornele DFIG cu crowbar activat, este prezentată în [3]. Schema

echivalentă a DFIG cu crowbar activat în regim de s.c. nesimetric este prezentată în Fig. 5:

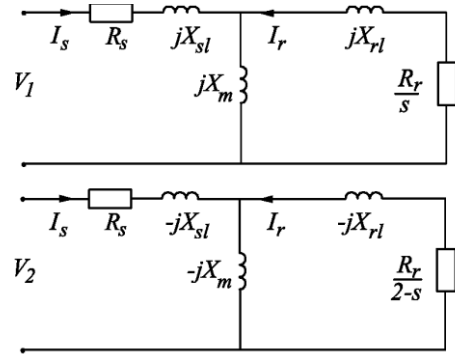


Fig. 5. Schema echivalentă a DFIG cu Crowbar activat.

În Fig. 5, indicele “1”- se referă la succesiunea direct; “2”- se referă la succesiunea inversă; “s”- se referă la parametric statorici; “r”- la parametric rotorici.

Component aperiodică a fluxului magnetic statoric în momentul scurtcircuitului,  $t = 0$  se va prezenta în forma:

$$\bar{\psi}_{sn}(0) = \psi_{sn} = \bar{\psi}_{s,pre}(0^-) - (\bar{\psi}_{sf,1}(0^+) + \bar{\psi}_{sf,2}(0^+)) = \frac{V_{pre}}{j\omega_s} - \left( \frac{V_1}{j\omega_s} + \frac{V_2}{-j\omega_s} \right) \quad (1)$$

Iar fluxul magnetic statoric în timpul scurtcircuitului va alcătui:

$$\bar{\psi}_s(t) = \frac{V_1}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} + \frac{V_2}{-j\omega_s} e^{-j\omega_s t} + \left( \frac{V_{pre}}{j\omega_s} - \left( \frac{V_1}{j\omega_s} + \frac{V_2}{-j\omega_s} \right) \right) e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (2)$$

$$\text{unde: } T_s = \frac{L'_s}{R_s} = \frac{L_s - L_m}{R_s}$$

Notând :  $L_s = L_{sl} + L_m$ ;  $L_r = L_{rl} + L_m$ ;  $K_s = \frac{L_s}{L_m}$  și  $K_r = \frac{L_r}{L_m}$ , și calculând  $i_s$  din Fig. 5, obținem:

$$\bar{i}_{s,2} = \frac{\bar{v}_2}{Z_2} \approx \frac{\bar{v}_2}{-j\omega_s \left( L_{sl} + \frac{L_m L_{rl}}{L_r} \right)} \quad (3)$$

Curentul de succesiune inversă în rotor poate fi în baza delimitării între circuitul de magnetizare și cel rotoric și va fi egal:

$$\bar{i}_{r,2} \approx - \frac{-j\omega_s L_m}{-j\omega_s L_m - j\omega_s L_{rl}} \bar{i}_{s,2} = - \frac{L_m}{L_r} \bar{i}_{s,2} \quad (4)$$

Substituind în relația fluxului magnetic rotoric obținem:

$$\bar{\psi}_{rf,2} = L_m \bar{i}_{s,2} + L_r \bar{i}_{r,2} \approx 0 \quad (5)$$

Valoarea fluxului magnetic rotoric aperiodic în momentul  $t = 0$  va alcătui:

$$\bar{\psi}_{rm}(0) = \psi_{rm} = \bar{\psi}_{r,pre}(0^-) - (\bar{\psi}_{rf,1}(0^+) + \bar{\psi}_{rf,2}(0^+)) = k_s \left( \frac{V_{pre}}{j\omega_s} - \frac{V_1}{j\omega_s} \right) \quad (6)$$

Pe durata s.c. fluxului magnetic rotoric se va calcula cu ajutorul formulei:

$$\bar{\psi}_r(t) = k_s \frac{V_1}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} + k_s \left( \frac{V_{pre}}{j\omega_s} - \frac{V_1}{j\omega_s} \right) e^{j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r}} \quad (7)$$

$$\text{unde: } T_r = \frac{L_r'}{R_r} = \frac{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}}{R_r} \quad (8)$$

Ca rezultat curenții statorici vor fi egali cu:

$$\bar{i}_s = \frac{\bar{\psi}_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_r} \frac{\bar{\psi}_r}{L_s} = \frac{\bar{\psi}_s}{L_s} - k_r \frac{\bar{\psi}_r}{L_s} \quad (9)$$

sau

$$\bar{i}_s = \frac{V_1}{j\omega_s L_s} (1 - k_s k_r) e^{j\omega_s t} + \frac{V_2}{-j\omega_s L_s} e^{-j\omega_s t} + \left( \frac{V_{pre} - (V_1 - V_2)}{j\omega_s L_s} \right) e^{-\frac{t}{T_s}} - k_s k_r \left( \frac{V_{pre} - V_1}{j\omega_s L_s} \right) e^{j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r}} \quad (10)$$

Repartiția componentei aperiodice a curentului rotoric între circuitul de magnetizare și circuitul rotoric se va prezenta cu ajutorul formulei:

$$\bar{i}_{rn} = -\frac{-j\omega_r L_m}{R_{r,tot} - j\omega_r L_r} \bar{i}_{sn} \quad (11)$$

de unde:

$$\bar{\psi}_{sn} = \left( L_s - \frac{-j\omega_r L_m^2}{R_{r,tot} - j\omega_r L_r} \right) \bar{i}_{sn} = L_{sn}' \bar{i}_{sn} \quad (12)$$

După cum se poate observa în DFIG, componenta aperiodică statorică a fluxului magnetic este influențată și de rezistența crowbar din rotor și de alunecarea rotorului. Constanta de timp statorică în acest caz este:

$$T_{s,DFIG} = \frac{L_{sn}'}{R_s} = \frac{\left( \frac{(13)}{L_s} - \frac{-j\omega_r L_m^2}{R_{r,tot} - j\omega_r L_r} \right)}{R_s} \quad (13)$$

Dacă se omit transformările intermediare pentru componenta aperiodică a fluxului rotoric putem scrie:

$$\bar{\psi}_{rn}(t) = \left( d e^{-\frac{t}{T_{s,DFIG}}} + c e^{-\frac{t}{T_{r,DFIG}}} e^{j\omega_r t} \right) \bar{\psi}_{rn} \quad (14)$$

$$\text{unde: } d = \left( 1 - \frac{-j\omega_r (L_{rl} + L_m // L_{sl})}{R_{r,tot} - j\omega_r (L_{rl} + L_m // L_{sl})} \right) \frac{\bar{\psi}_{sn}}{\bar{\psi}_{rn}}$$

$$c = 1 - d$$

Aici  $\bar{\psi}_{sn}$  este fluxul aperiodic statoric calculat cu formula (1). Componenta de succesiune inversă a curentului rotoric se va calcula cu ajutorul formulei:

$$\bar{i}_{r,2} = -\frac{-j\omega_s L_m}{\frac{R_{r,tot}}{2-s} - j\omega_s L_r} \bar{i}_{s,2} = -\frac{-j\omega_s L_m}{\frac{R_{r,tot}}{2-s} - j\omega_s L_r} \frac{\bar{v}_2}{Z_2} \quad (15)$$

iar fluxul magnetic magnetic cu relația:

$$\bar{\psi}_{rf,2} = L_m \bar{i}_{s,2} + L_r \bar{i}_{r,2} = \left( L_m + \frac{j\omega_s L_m L_r}{\frac{R_{r,tot}}{2-s} - j\omega_s L_r} \right) \bar{i}_{s,2} =$$

$$= L_{r2} \bar{i}_{s,2} = L_{r2} \frac{\bar{v}_2}{Z_2} \quad (16)$$

Aici  $L_{r2}$  este coeficientul de legătură dintre fluxul rotoric de secvență inversă și componenta de secvență inversă a curentului rotoric în DFIG.

Fluxul magnetic statoric de succesiune inversă se va calcula cu ajutorul formulei:

$$\bar{\psi}_{sf,2} = \left( L_s + \frac{j\omega_s L_m^2}{\frac{R_{r,tot}}{2-s} - j\omega_s L_r} \right) \bar{i}_{s,2} =$$

$$= L_{s2} \bar{i}_{s,2} \approx \frac{Z_2}{-j\omega_s} \bar{i}_{s,2} = \frac{\bar{v}_2}{-j\omega_s} \quad (17)$$

În momentul scurtcircuitului  $t = 0$ , componeta aperiodică a fluxului rotoric este:

$$\bar{\psi}_{rn}(0) = \bar{\psi}_{rn} = k_s \frac{V_{s,pre}}{j\omega_s} - \left( k_s \frac{V_1}{j\omega_s} + L_{r2} \frac{V_2}{Z_2} \right) \quad (18)$$

$$\bar{\psi}_{sn} = \left( L_s - \frac{-j\omega_r L_m^2}{R_{r,tot} - j\omega_r L_r} \right) \bar{i}_{sn} = L_{sn}' \bar{i}_{sn}$$

Fluxul rotoric rezultat în timpul regimului de s.c. va alcătui:

$$\bar{\psi}_r(t) = k_s \frac{V_1}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} + L_{r2} \frac{V_2}{Z_2} e^{-j\omega_s t} +$$

$$\left( d e^{-\frac{t}{T_{s,DFIG}}} + c e^{-\frac{t}{T_{r,DFIG}}} e^{j\omega_r t} \right) \left( k_s \frac{V_{pre}}{j\omega_s} - \left( k_s \frac{V_1}{j\omega_s} + L_{r2} \frac{V_2}{Z_2} \right) \right)$$

Curenții de succesiune directă statorici și rotorici se vor calcula cu ajutorul formulelor:

$$\bar{i}_{s,1} = \frac{\bar{v}_1}{Z_1}, \quad \bar{i}_{r,1} = -\frac{j\omega_s L_m}{\frac{R_{r,tot}}{s} + j\omega_s L_r} \bar{i}_{s,1}$$

$$s \neq 0: \quad \bar{\psi}_{rf,1} = \left( L_m - \frac{j\omega_s L_m L_r}{\frac{R_{r,tot}}{s} + j\omega_s L_r} \right) \bar{i}_{s,1} = \bar{\psi}_{rf,1} e^{j\omega_s t} \quad (20)$$

$$s = 0: \bar{\psi}_{rf,1} = k_s \bar{\psi}_{sf,1} = k_s \frac{\bar{v}_1}{j\omega_s} = \psi_{rf,1} e^{j\omega_s t}$$

Reieșind din relațiile fluxurilor magnetice statorice și rotorice pot fi calculați curenții în circuitele rotorice și statorice la s.c. în sistemul energetic cu ajutorul formulelor:

$$\begin{aligned} \bar{i}_s(t) &= \bar{i}_{sf}(t) + \bar{i}_{sn}(t) \\ \bar{i}_{sf}(t) &= \left( \frac{V_1}{j\omega_s L_s} - k_r \frac{\psi_{rf,1}}{L_s} \right) e^{j\omega_s t} + \left( \frac{L_{s2}}{L_s} - k_r \frac{L_{r2}}{L_s} \right) \frac{V_2}{Z_2} e^{-j\omega_s t} = \\ &= \left( \frac{V_1}{j\omega_s L_s} - k_r \frac{\psi_{rf,1}}{L_s} \right) e^{j\omega_s t} + \frac{V_2}{Z_2} e^{-j\omega_s t} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \bar{i}_{sn}(t) &= \frac{V_{pre} - (V_1 - V_2)}{j\omega_s L_s} e^{-t/T_{s,DFIG}} - \frac{k_r}{L_s} \left( de^{-t/T_{s,DFIG}} + \right. \\ &\quad \left. + ce^{-t/T_{r,DFIG}} e^{j\omega_r t} \right) \left( \psi_{r,pre} - \left( \psi_{rf,1} + L_{r2} \frac{V_2}{Z_2} \right) \right) \end{aligned}$$

Valorile parametrilor regimului se vor calcula cu ajutorul formulelor:

$$\begin{aligned} \bar{i}_{s,pre} &= -\frac{S_{pre}^*}{3\bar{v}_{pre}^*}, \quad \bar{\psi}_{s,pre} \approx \frac{\bar{v}_{pre}}{j\omega_s}, \quad \bar{i}_{r,pre} = \frac{\bar{\psi}_{s,pre} - L_s \bar{i}_{s,pre}}{L_m} \\ \bar{\psi}_{r,pre} &= \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_m} \frac{S_{pre}^*}{3\bar{v}_{pre}^*} + \frac{L_r}{L_m} \frac{\bar{v}_{pre}}{j\omega_s} = \psi_{r,pre} e^{j\omega_s t} \end{aligned} \quad (22)$$

Metoda prezentată în lucrare, permite efectuarea analitică a calculului curenților de s.c. în circuitele generatoarelor DFIG cu crowbar activat. Cureții rotorici se vor calcula cu ajutorul formulelor (11), (12),(20),(21),(22). Cu ajutorul metodei expuse au fost efectuate unele calcule estimative pentru instalațiile cu DFIG conectate la sistemul energetic al R. Moldova.

## CONCLUZII.

1. Au fost analizate succint sistemele de protecții a generatoarelor DFIG de tip crowbar, împotriva supracurenților din timpul s.c. din sistemul energetic;
2. A fost prezentată metoda analitică de calcul a curenților în circuitele DFIG la scurtcircuite în sistemul energetic.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] M. Ebeed, B. Omar Nour Elden, and A.A. Ebrahim, "Assessing behaviour of the outer crowbar protection with the DFIG during grid fault," April 2013.
- [2] Omar Naulden, "Behavior of DFIG wind turbines with crowbar protection", International journal of Electrical sciences vol. 3, Nr.12.
- [3] Francesco Sulla, "Fault behavior of wind turbines," Lund University 2012.
- [4] Abdelatif Noubrik, Larbi Alouin and Pascal Bussy, "Analysis and simulation of a Crowbar protection for DFIG wind turbines during power system disturbances," journal of mechanics engineering and automation, 2011.