

LIMITATOR SUPRACONDUCTOR HTS REZISTIV PENTRU CURENȚI DE AVARIE

Ion DOBRIN¹, Dan ENACHE¹, George DUMITRU¹, Mihai GUȚU¹

¹ Institutul Național de Cercetare și Proiectare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA, București
office@icpe-ca.ro¹

Rezumat. Lucrarea de față se referă la realizarea unui limitator de curenți de avarie supraconductor, ca un prim model pentru realizarea de limitatoare supraconductoare de curent, de uz industrial, cu aplicație în rețele de distribuție națională a energiei electrice în scopul protecției la supracurenți apăruiți datorită scurtcircuitelor accidentale. Prin introducerea unui limitator supraconductor de curenți de avarie într-o rețea de distribuție, supracurentul apărut ca urmare a unei avarii în sistem este redus sub limita de avariere a elementelor circuitului. În cadrul lucrării a fost elaborat un model conceptual de limitator supraconductor de tip rezistiv, care utilizează ca material supraconductor, banda supraconductoare de înaltă temperatură (HTS), de 6 mm lățime și 0,11 mm grosime de tip YBCO, pentru aceasta fiind măsurate proprietățile materialului supraconductor în c.a. pe un dispozitiv realizat în acest scop. Limitatorul supraconductor HTS a fost proiectat, realizat și testat, descrierea acestuia fiind redată în detaliu.

1. INTRODUCERE

Cererea din ce în ce mai mare pentru energie electrică are ca rezultat creșterea dimensiunilor stațiilor de generare a curentului electric și inclusiv a rețelelor de distribuție, ceea ce poate duce uneori la o funcționare anormală a rețelei de transport a energiei electrice. Această anormalitate poate fi tradusă și prin creșterea semnificativă a supracurenților de avarie în sistem, ceea ce va duce, în mod evident, la înlocuirea transformatoarelor și întrerupătoarelor clasice din sistemele de alimentare cu echipamente noi, mai performante. Prin introducerea unui SFCL într-o rețea de distribuție, supracurentul apărut în sistem ca urmare a unei avarii este redus considerabil. Acest tip de limitator prezintă o impedență foarte mică în timpul funcționării normale a sistemului (supraconductorul se află în stare supraconductoare), iar în cazul unei defecțiuni limitatorul își mărește foarte mult impedența (supraconductorul trece în stare rezistivă), astfel încât împiedică trecerea curentului în exces în sistem, curent care are ca principal efect deteriorarea echipamentelor electrice prin încălzirea suplimentară [1]. Limitatoarele de curent supraconductoare oferă numeroase beneficii în ceea ce privește menținerea și protecția rețelelor de distribuție a energiei electrice prin intermediul stabilității și a eficienței mult ridicate față de sistemele de protecție clasice (fuzibile, rele maxime, etc.). Sistemele de protecție clasice necesită o mentenanță permanentă, trebuie utilizate la tensiuni mai mici de 35 kV, au pierderi reactive constante mari și contribuie în mod activ la căderile de tensiune ale rețelei. Principalele caracteristici care determină utilizarea limitatoarelor de curent supraconductoare sunt răspunsul extrem de rapid în cazul apariției unor curenți de avarie în sistem, reduc căderile de tensiune cauzate de componentele cu rezistivitate mare a sistemului, nu au nevoie de niciun fel de control extern și nu introduc efecte secundare nedorite în cazul unei funcționări normale a rețelei. Deși limitatoarele de curent supraconductor HTS se află într-un proces permanent de cercetare și dezvoltare, performanța tehnico-economică a acestora a fost demonstrată în numeroase proiecte propuse la nivel mondial atât în SUA, cât și în Europa și Asia, cu instalare și testare practică în rețelele de distribuție ale unor orașe. În SUA au fost realizate două proiecte de tip SFCL de 138 kV. Unul dintre acestea a fost propus de compania americană Zenergy Power Inc. și a fost implementat ca și prototip în rețeaua de distribuție a

statului Ohio în anul 2011. Limitatorul folosit este unul de tip inductiv cu miez saturat și cablu HTS. Unul dintre testele realizate în cadrul acestui proiect a fost considerarea unei stări normale ce are valoarea curentului de 1 kA RMS, și un curent simetric de avarie de 15 kA RMS, care a scăzut cu 32% folosind limitatorul descris mai sus, pentru una dintre geometriile propuse în cadrul proiectului [2, 3]. Cel de-al doilea proiect HYDRA, a constat în realizarea unui limitator denumit „SuperLimiter™” fabricat de compania americană American Superconductor Corporation și a fost testat cu succes în 2010. Acesta este un limitator de tip rezistiv realizat cu cablu HTS și capabilitate de a limita curenți de o valoare mult mai mare decât anteriorul, și anume de la 63 kA la 40 kA (aproximativ 35-36%) [2, 3]. Alte astfel de limitatoare de curent, însă de data aceasta de numai 12 kV au fost introduse și în Europa, de compania germană Nexans SuperConductors GmbH și instalate în rețelele orașelor Lancashire, UK și Boxberg, Germany în anul 2009. Acestea sunt două limitatoare de tip rezistiv, constând într-un anume aranjament de bobine supraconductoare BSCCO-2212, fabricate folosind tehnologia avansată MCP (melting, casting and processing) cu o capabilitate de limitare a curenților de avarie de la 50 kA la 6 kA (aproximativ 80%) [2, 3]. În 2008-2009 În Asia au fost introduse trei limitatoare de curent în rețelele de distribuție ale Koreei (22.9 kV Hybrid SFCL), Japoniei (22 kV SFCL) și Chinei (35 kV Saturable-Core SFCL) [2, 3].

2. MODEL CONCEPTUAL DE LIMITATOR SUPRACONDUCTOR

Limitatorul de curent supraconductor este un limitator de tip rezistiv, care funcționează pe principiul saltului materialului supraconductor din starea supraconductoare în stare rezistivă (normal conductoare) atunci când unul din parametrii critici ai materialului supraconductor este depășit (I_c , B_c sau T_c). În cazul descris, odată cu apariția unor curenți de avarie I , unde $I > I_c$, supraconductorul trece în stare rezistivă.

Limitatorul supraconductor (LSC) a carui structură este prezentată în Fig. 1 este alcătuit dintr-o spirală realizată din banda supraconductoare HTS de tip YBCO [4], cu următoarele caracteristici:

- Tip bandă - SCS 6050
- Curent critic – 150 A
- Lățime bandă – 6 mm
- Grosime bandă – 0,1 mm
- Diametrul minim de îndoire – 11 mm

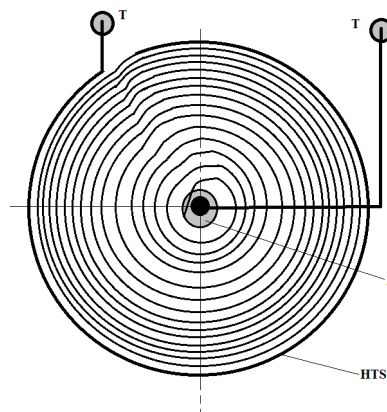


Fig. 1. Modelul geometric al limitatorului supraconductor

Materialul supraconductor HTS al LSC, este dispus sub formă de spirală pentru menținerea unei răcirii corespunzătoare cu agent criogenic. Acest element poate fi de tip galet simplu sau galet dublu. În cazul dimensionării acestui limitator pentru valori ridicate ale tensiunii / curentului, se pot cupla mai multe elemente de limitator în serie sau în paralel. O astfel de „baterie” de limitatoare elementare asamblată într-un criostat în care este introdus azot lichid este prezentată în Fig. 2, elementele constructive ale acestui ansamblu (limitator-criostat) sunt: 1 – Criostat, 2 - Ecran termic, 3 - Conductor de curent, 4 - Bateria LSC, 5 - Terminal cuplare rețea, 6 - Baie de azot lichid.

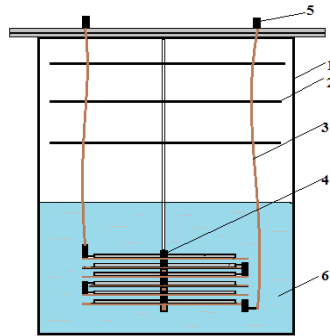


Fig. 2. Ansamblul limitator supraconductor de curent și criostat

3. CARACTERIZAREA SUPRACONDUCTORILOR HTS IN C.A.

3.1 Montaj experimental

Instalația pentru măsurarea proprietăților materialelor HTS în curent alternativ prezentată în Fig. 3, are ca elemente constructive placa de susținere (1) montată într-un criostat (2). Placa de susținere este acoperită cu un ecran termic (3) în vederea limitării fluxului termic radiativ dinspre peretii criostatului. Răcirea probei este asigurată de un crioracitor GM (4), acesta având două trepte de temperatură, prima treaptă (5) asigurând temperatura de 50 K, treapta a II-a (6) asigurând temperatura de 4.2 K. Ecranul termic este conectat la o flanșă de cupru (7), aceasta fiind ancorată termic la treapta I a crioracitorului. Proba supusă testării va fi montată pe un suport termostatat (8) ce se află în contact termic cu treapta a II-a a crioracitorului. Suportul probei realizat din cupru, acesta asigurând temperatura probei în intervalul 4,2 K – 300 K. Interiorul criostatului (9) este vidat, presiunea din interiorul acestuia fiind de 10^{-5} mbar. Criostatul este montat pe un suport metalic mobil (10). Alimentarea cu curent electric a probei supusă testării este realizată prin conductorii micși (11 și 12), ce asigură un curent de alimentare de până la 300 A.

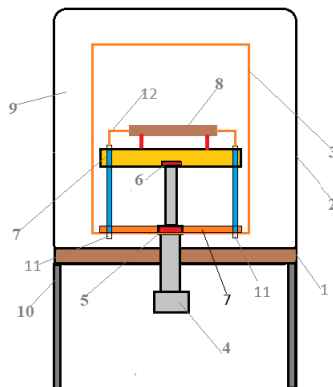


Fig. 3. Instalație de măsurare a proprietăților în c.a. a materialelor HTS.

Aceasta instalație asigură un regim termic variabil într-un domeniu extins de temperatura (4,2 – 300 K) și stabil (izoterm) pe orice palier dorit, asigură un nivel de vidare în interiorul criostatului de $10^{-5}..10^{-6}$ mbar, permițând alimentarea cu curenți intensi (0 – 500 A) a probelor HTS supuse testării.

3.2 Măsurarea caracteristicilor materialelor supraconductoare în c.a.

Scopul testelor experimentale desfășurate a fost acela de a determina curentul critic al benzii supraconductoare în curent alternativ, în funcție de frecvența acestuia. Pentru o acuratețe cât mai bună a măsurătorilor, proba supraconductoare are 150 mm lungime, iar punctele de măsură sunt amplasate la 15 mm față de fiecare terminal de alimentare cu curent alternativ al probei. Au fost realizate măsurători pentru două sectoare de bandă HTS, cu lățimea de 6 mm de la firma Superpower Inc. și respectiv de 4 mm. de la firma SuperOx [5]. În Fig. 4 și 5 este prezentată caracteristica U-I pentru banda HTS de tip YBCO cu o lățime de 6 mm și respectiv caracteristica U-I pentru banda HTS de tip YBCO cu o lățime de 4 mm, la diferite frecvențe.

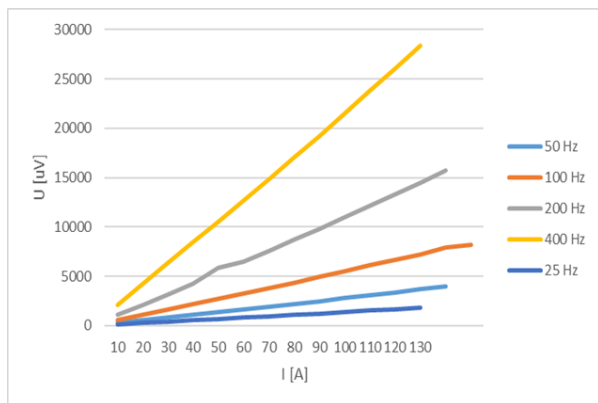


Fig. 4. Tensiunea în funcție de curent pentru banda HTS de tip YBCO cu o lățime de 6 mm

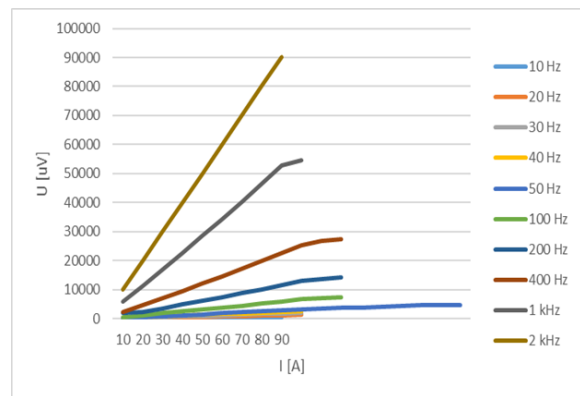


Fig. 5. Tensiunea în funcție de curent pentru banda HTS de tip YBCO cu o lățime de 4 mm

După determinarea caracteristicii U-I pentru cele două benzi HTS, a fost posibilă evaluarea pierderilor per unitatea de lungime utilizând următorul algoritm:

Considerente:

- În zona de supraconducție, creșterea căderii de tensiune pe proba supraconductoare este dată de apariția și creșterea impedanței în curent alternativ, a probei;
- Pierderea de putere pe probă, în zona de supraconducție, este dată de impedanța prezentată de proba supraconductoare, care este dependentă de frecvență.
- Este de așteptat, ca aceste pierderi de putere să crească atât cu frecvența curentului alternativ de alimentare cât și cu valoarea intensității acestuia.

Astfel vom avea:

Rezistența electrică dată de relația:

$$R = \frac{U_{\text{masurat}} - E}{I} \quad (1)$$

Unde:

R – rezistența probei pe unitatea de lungime [Ωcm^{-1}];

U_{masurat} – căderea de tensiune măsurată pe proba HTS [V];

L – lungimea probei măsurate (în acest caz are 16 cm) [m];

E – criteriul de curent critic l [μVcm^{-1}] al benzii HTS;

I – curentul de alimentare [A].

Iar pierderile de putere cu relația:

$$P = R * I^2 * \cos\alpha \quad (2)$$

unde – puterea (pierderile în c.a.) pe unitatea de lungime [Wcm^{-1}];

R – rezistența probei pe unitatea de lungime [Ωcm^{-1}];

I – curentul de alimentare [A].

α – unghiul de defazare dintre curent și tensiune.

Aplicând rel. 2. rezultatelor experimentale, se obține pentru rezistența electrică a probei, în funcție de frecvența aplicată, rezultatele prezentate în Fig. 7 și 8.

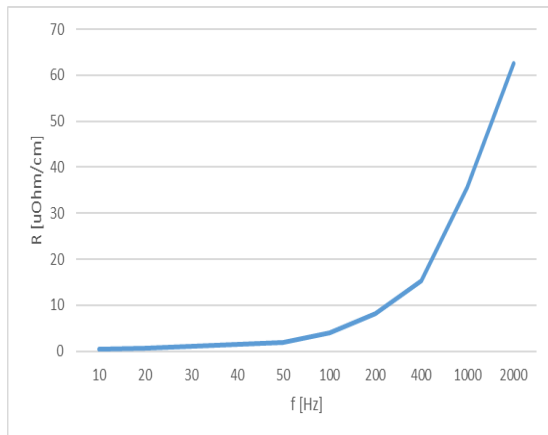


Fig. 7. Variația rezistenței probei de HTS (YBCO) de 4 mm lățime – SuperOx

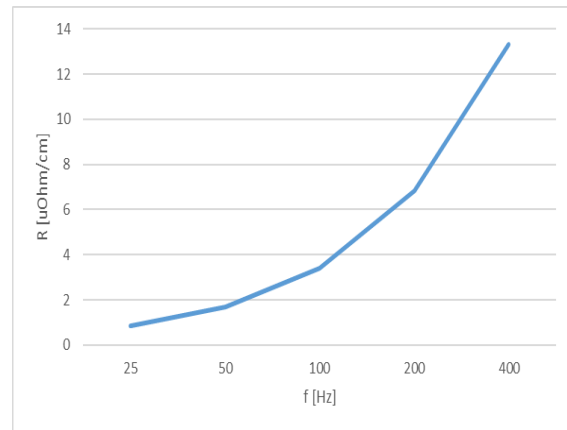


Fig. 8. Variația rezistenței probei de HTS (YBCO) de 6 mm lățime – Superpower.

Rezultatul calculelor obținute prin aplicarea rel. (1), pentru evaluarea pierderilor de putere în c.a. pe benzile supraconductoare de 4 și respectiv 6 mm lățime, sunt redată în Fig. 9 și Fig. 10.

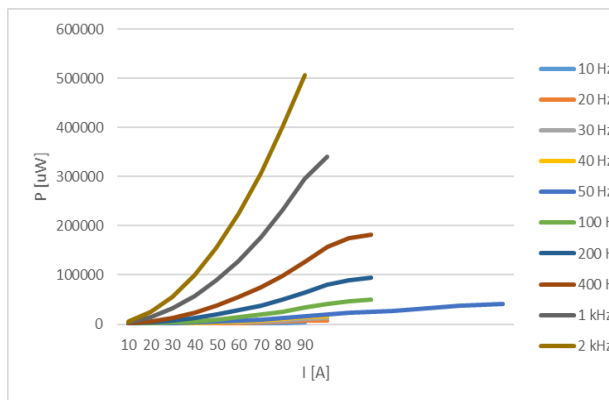


Fig. 9. Evaluarea pierderilor din banda HTS de 4 mm în funcție de curent, la diferite frecvențe de funcționare (valorile sunt per unitatea de lungime de 1 cm)

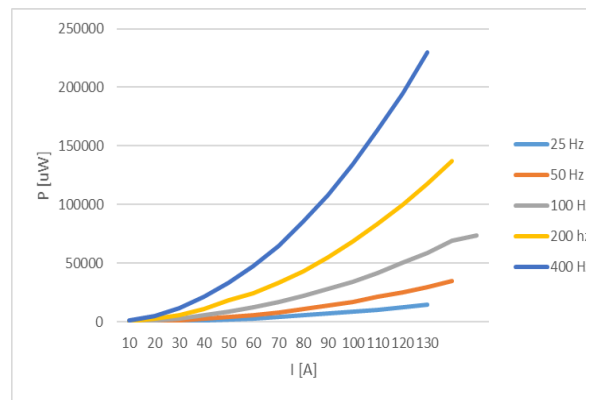


Fig. 10. Evaluarea pierderilor din banda HTS de 6 mm în funcție de curent, la diferite frecvențe de funcționare (valorile sunt per unitatea de lungime de 1 cm)

Din Fig. 9 se poate observa o creștere a pierderilor din bandă în același timp cu creșterea frecvenței curentului de alimentare. Din Fig. 10, ca și în cazul benzii supraconductoare de 4 mm, se poate observa o creștere similară a pierderilor din bandă o dată cu creșterea frecvenței de lucru.

Pentru ambele cazuri se observă o dublare a pierderilor de putere în materialul HTS o dată cu dublarea frecvenței de lucru.

Pentru frecvența de 50 Hz, care este frecvența rețelelor din țara noastră, pierderile de putere sunt de 20,275 mW pentru banda de 4 mm și respectiv de 17,213 mW pentru banda de 6 mm.

4. REALIZARE LIMITATOR SUPRACONDUCTOR HTS

Banda supraconductoare HTS, izolată cu kapton, a fost bobinată spiralat în cele 8 cercuri concentrice ale suportului izolator (tur și retur), iar capetele acestora au fost lipite de terminalele de alimentare electrică, lipirea fiind realizată prin intermediul unor benzi de cupru, la temperatură și presiune controlate, pentru a obține rezistența minimă de contact (\sim zeci n Ω). În Fig. 11 este prezentat modelul CAD al limitatorului supraconductor rezistiv, în Fig. 12 fiind prezentat limitatorul HTS realizat.

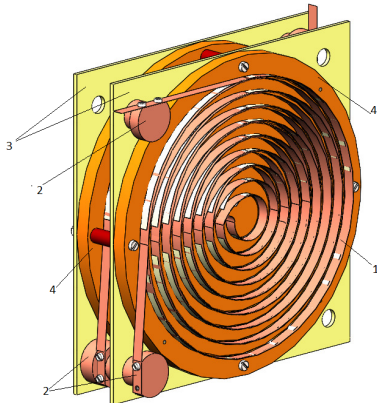


Fig. 11. Vedere frontală CAD a limitatorului de curent HTS



Fig. 12. Model experimental de limitator supraconductor HTS de tip rezistiv

Limitatorul supraconductor prezentat în Fig. 12 are următoarele elemente constructive:

1. Suport bandă supraconductoare – este realizat din lamele de sticlătextolit, pe acestea fiind montată banda supraconductoare HTS.
2. Borne de alimentare – sunt borne realizate din cupru, acestea asigură alimentarea cu curent electric a benzii supraconductoare.
3. Placa suport limitator – este realizată din sticlătextolit, pe aceasta fiind montate atât banda supraconductoare cât și bornele de alimentare ale limitatorului.
4. Flanșa suport bandă – este o flanșă realizată de asemenea din sticlătextolit, prevăzută cu caneluri în care sunt introduși suportii benzii supraconductoare.

Pentru realizarea testelor în c.a. pentru limitatorul supraconductor HTS de tip rezistiv în vederea demonstrării funcționabilității acestuia, a fost utilizată configurația electrică prezentată sub formă de schemă bloc în Fig. 13. Datorită faptului că tensiunea pe banda supraconductoare HTS este mică ($\sim \mu\text{V}$), aceasta nu poate fi măsurată cu un voltmetru convențional. Măsurătorile căderii de tensiune pe banda supraconductoare HTS supusă testării sunt realizate cu un instrument de tip Lock-in Amplifier produs de compania Stanford Research Systems model SR 830.

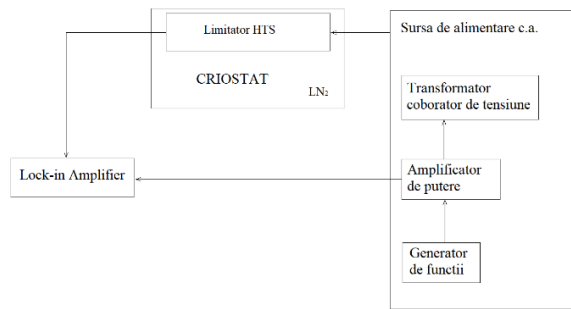


Fig. 13 . Schema bloc a sistemului de testare în c.a. a limitatorului HTS.

Scopul testelor experimentale desfășurate a fost acela de a demonstra funcționarea modelului experimental de limitator supraconductor HTS de tip rezistiv în curent alternativ, la frecvența de funcționare a rețelei publice de alimentare cu energie din țara noastră, și anume 50 Hz. După pregătirea sistemului de testare, modelul experimental de limitator supraconductor a fost imersat în baie de azot în interiorul unui criostat, și răcit la temperatura de 77 K. În Fig. 14 este prezentată instalația utilizată pentru testarea limitatorului HTS.



Fig. 14. Sistemul de măsurare folosit pentru testarea limitatorului supraconductor HTS rezistiv în c.a.

Au fost efectuate teste în c.c. pentru stabilirea funcționabilității materialului supraconductor HTS și detectarea eventualelor defecte existente. Căderea de tensiune pe limitatorul supraconductor HTS rezistiv în timpul funcționării este prezentată în graficul din Fig. 15. Observăm că valoarea tensiunii rămâne relativ foarte mică, atâta timp cât limitatorul se află în stare supraconductoare. În momentul în care curentul de alimentare se aproprie de valoarea critică a limitatorului, căderea de tensiune începe să crească până când limitatorul iese din starea supraconductoare iar curentul va trece prin rezistența de avarie. Se pot observa că apar fluctuații în valoarea tensiunii din cauza faptului că limitatorul de curent comută între starea normal conductoare și cea supraconductoare.

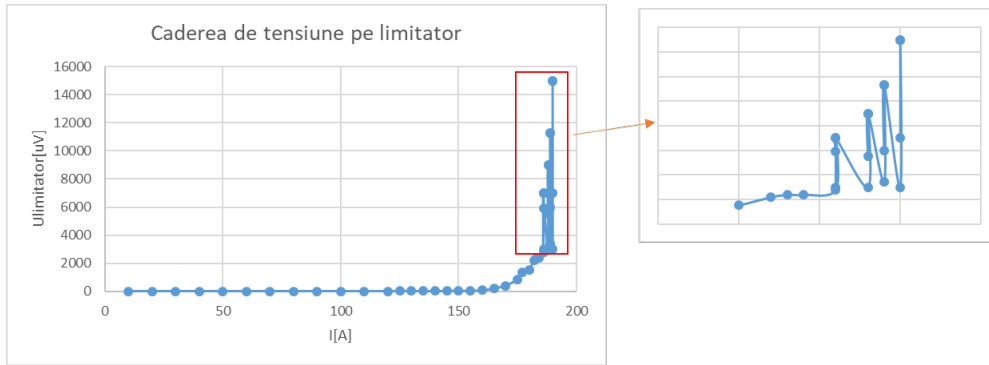


Fig. 15. Căderea de tensiune pe limitatorul supraconductor HTS de tip rezistiv în c.c.

Au fost efectuate și teste finale în curent alternativ a limitatorului supraconductor HTS de tip rezistiv. Astfel acesta a fost alimentat în curent alternativ la diverse valori de curent în domeniul 0-200 A și au fost înregistrate căderile de tensiune pe LSC și rezistența sunt, rezultatele obținute fiind prezentate în Fig. 16.

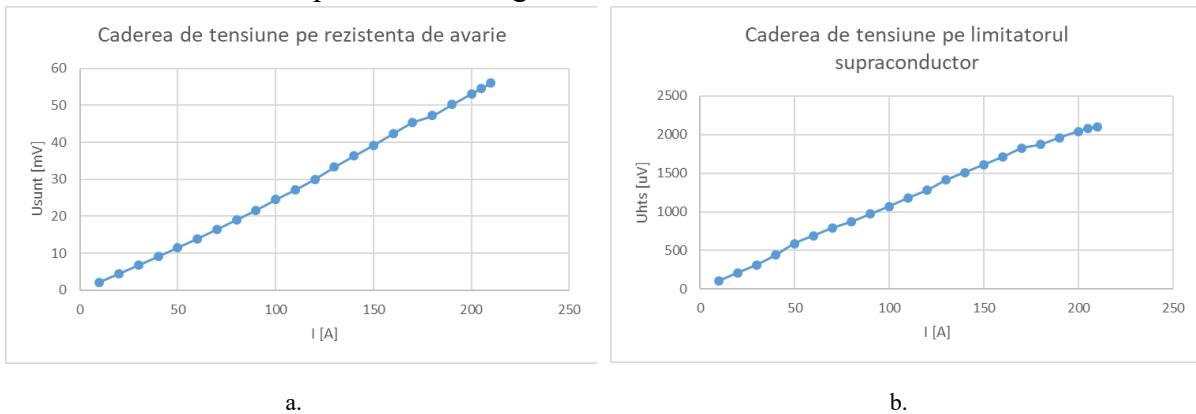


Fig. 16. Căderea de tensiune pe: a. rezistența de avarie; b. limitatorul supraconductor

Au fost monitorizate și vizualizate formele de undă pentru curent și cădere de tensiune la bornele limitatorului supraconductor cu un osciloscop Fluke model 190-202 (Fig 17), fiind măsurat și defazajul între curent și tensiune, necesar pentru calcul pierderilor în c.a. ce apar în modelul experimental de limitator supraconductor.

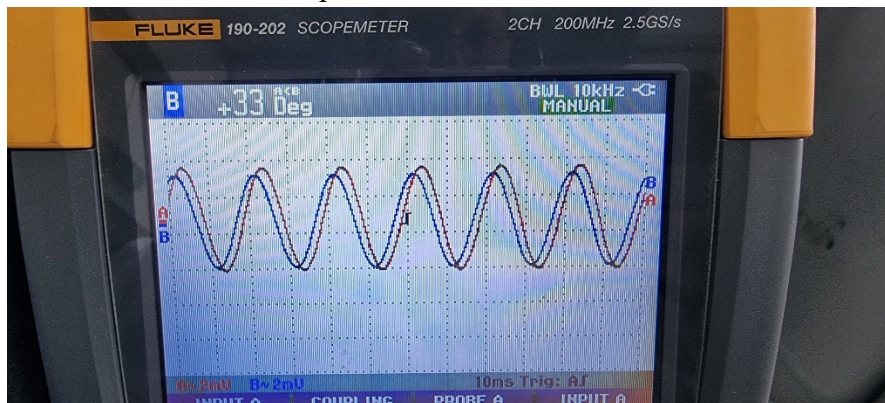


Fig. 17 . Formele de undă pentru tensiune și curent la bornele limitatorului supraconductor

4. CONCLUZII

În cadrul lucrării a fost prezentat un limitator supraconductor HTS de tip rezistiv, care a fost conceput și realizat integral în ICPE-CA, Laboratorul de supraconductibilitate aplicată. Modelul de laborator are următoarele caracteristici:

- Curent nominal de lucru: 100 A c.a.
- Tensiune lucru c.a.: 6 V
- Putere protejată: 600 W.
- Lungime bandă HTS: 30 m
- Temperatura de lucru: -196 °C.
- Număr elemente: 2

Pentru obținerea parametrilor de proiectare, au fost determinate pierderile în c.a. atât pentru materialul supraconductor banda HTS de 4 mm produsă de firma SuperOx cât și pentru banda 6 mm lățime produsă de firma Superpower, Inc. funcție de diverse frecvențe de lucru. Pierderile mai mici din banda HTS 6 mm au determinat alegerea benzii HTS pentru realizarea limitatorului. Totodată a fost măsurată experimental și caracteristica I-V a benzii HTS pentru stabilirea curentului critic al acesteia. Valoarea obținută a fost de 185 A la temperatura de -196 °C pentru banda HTS aleasă.

Testele preliminare realizate în c.a. pe limitatorul realizat, au pus în evidență funcționarea în regim supraconductor a acestuia, pentru valori ale curentului din circuit de 0-190 °C.

Urmează ca testele finale să pună în evidență funcționarea în situații de avarie (curenți $I_A > I_C$). Pentru a realiza aceste teste, este necesară generarea unor pulsuri de curent cu valori maxime care să depășească curentul critic al supraconductorului.

CONFIRMARE

Autorii recunosc finanțarea acestei lucrări, prin contractul PN 5301/2023. cu Ministerul Cercetării și Digitalizării din România.

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XX, ediția 2024.

BIBLIOGRAFIE

1. B.V. Vaishnavi, R.S. Angelin Suji, D.P. Trivenishre, Nidha Nabi, G.J. Sowmya, *Superconducting Fault Current Limiter & Its Application*, International Journal of Scientific & Engineering Research, 7, 5, 2016.
2. M. Young, *Superconducting Fault Current Limiters*, Technology Watch 2009, EPRI, Palo Alto, CA: 2009.
3. M. Noe, M.Steurer, *High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status*, Supercond. Sci. Technol. 20 (2007), R15-R29.
4. ***Superpower Inc., www.superpower.com, USA.
5. ***SuperOx, <https://eng.superox.ru/>.