

CONTRIBUȚII LA STUDIUL FENOMENELOR TRANZITORII ÎN ECHIPAMENTELE NAVALE ALIMENTATE CU ÎNALTĂ TENSIUNE

Drd. ing. Robert MITREA¹, Prof. univ. dr. ing. Gheorghe SAMOILESCU²

¹CMA SHIPS Company – Academia Tehnică Militară, București,

²Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța

REZUMAT. Această lucrare abordează fenomenele de rezonanță ce apar într-un sistem de distribuție izolat în timpul unor evenimente tranzitorii: energizări repetate sau comutarea convertorului de putere. Se face o analiză a energizării unui sistem de distribuție radială la bord instalat pe o navă electrică și de a determina modul în care diferiți parametri de scurgere care pot provoca probleme de rezonanță - supratensiunile de vârf ridicate atunci când întrerupătorul este închis, sunt relevanți. Lucrarea prezintă un model detaliat al întregului sistem de distribuție, care este validat folosind măsurători de infiltrație, având la bază un caz real în care evenimente perturbatoare au afectat transformatoarele navelor, cauzând scoaterea din funcțiune a sistemului electroenergetic naval.

Cuvinte cheie: sistemul electroenergetic naval, transformatoare electrice, fenomen tranzitorii, generatoare electrice, supratensiune.

ABSTRACT. The present paper aims to study resonance phenomena that occur in an isolated distribution system during transient processes: repeated system energising and shifting of power converter. It also analyses the energizing of a radial distribution system installed onboard an electric powered vessel and determines to what extent different discharge parameters which may cause resonance issues - peak overpotential when the switch is turned off - are relevant. The paper offers a detailed insight into the entire distribution system which is validated by infiltration measurements. This study relies on real life events and cases, in which disruptive events affected vessels' transformers and caused the black-out of the naval electro-energetic system.

Keywords: naval electro-energetic system, electrical power transformers, transient processes, electrical generators, overpotential.

1. INTRODUCERE

La stadiul tehnic actual atins de civilizație, singurul mijloc de transport, în afară de nave, nu poate asigura traficul peste mări și oceane a miliardelor de tone de mărfuri intrate anual în circuitul schimburilor internaționale.

Dimensiunea sistemului electroenergetic al unei nave depinde de tipul acesteia și de interdependența dintre acesta și instalațiile de propulsie.

Obiectivul principal al descompunerii sistemului electroenergetic naval constă în asigurarea echilibrului puterilor generate și consumate în fiecare secție, în vederea unei funcționări avantajoase din punct de vedere economic. La proiectarea centralelor electrice se prevede funcționarea în paralel a generatoarelor pe un sistem sau două pe bare, care sunt împărțite pe secții cuplate între ele. Al doilea obiectiv este că fiecare subsistem participă la menținerea constantă a frecvenței, rezultând astfel o reglare automată descentralizată a acestui indice de calitate a energiei electrice. Realizarea acestui obiectiv al descompunerii este asigurată cu ajutorul sistemelor de reglare a frecvenței și puterii.[1]

O navă poate fi considerată ca fiind un sistem independent care poate îndeplini toate sarcinile necesare fără ajutorul unor entități externe [2]. Toate aceste sarcini, care includ propulsia, iluminatul și condiționarea, necesită electricitate. Din acest motiv, centrala electrică de pe navă trebuie să poată garanta că sunt disponibile cantitățile corespunzătoare de energie și de putere pentru ca nava să poată îndeplini cu ușurință aceste funcții [3].

Principalele caracteristici ale sistemului electric a unei nave sunt fiabilitatea, care reprezintă asigurarea faptului că fiecare piesă de echipament va funcționa chiar și în cele mai nefavorabile condiții și cu continuitatea sarcinilor, ceea ce înseamnă asigurarea, în special în condiții de urgență, că alimentarea cu energie electrică va fi suficientă cel puțin pentru aparatele necesare pentru securitatea navei.

În timp ce fiabilitatea se concentrează pe componente individuale, continuitatea sarcinii este o proprietate a întregului sistem electric. Datorită acestei cerințe, atenție este acordată problemelor care pot afecta funcționalitatea sistemului, cum ar fi fenomenele de rezonanță, care pot fi foarte periculoase într-un sistem electric deoarece pot provoca supratensiuni

mari care pot deteriora aparatele instalate [4,5]. Figura 1 prezintă un exemplu al efectului supratensiunilor repetate pe bobinarea transformatorului.

Într-un exemplu raportat în figura 1 [5], eșecul catastrofal al unui condensator din camera de filtrare armonică la pupa de pe RMS Queen Mary este descris ca o consecință a distorsiunii armonice excesive în rețeaua de distribuție de 11 kV.

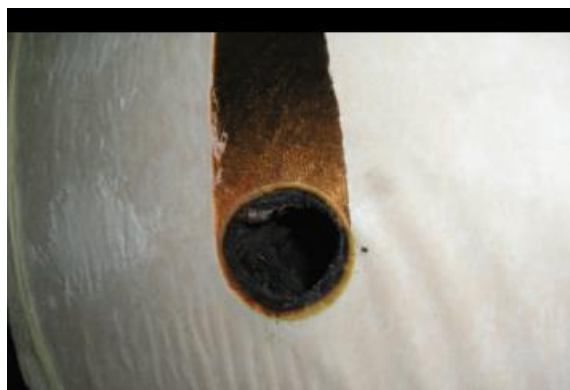


Fig. 1. Efectul supratensiunilor repetitive asupra bobinării transformatorului.

Evenimentele tranzitorii se datorează oscilațiilor dintre componentele conservatoare conectate sau, în orice caz, prezente într-un circuit electric, și în general apar din două motive. Primul îl reprezintă prezența armonicilor de tensiune sau curentul în circuit la o frecvență apropiată de frecvența de rezonanță. Al doilea motiv este legat de evenimentele tranzitorii care determină oscilarea sistemului la frecvența sa naturală [7,8].

Nu este întotdeauna posibilă cunoașterea frecvenței de rezonanță, deoarece valorile exacte ale parametrilor RLC și modul în care sunt conectați în circuit sunt necunoscute.

Mulți parametri, inclusiv inductanța seriilor și magnetizarea transformatoarelor și capacitatea corectorului factorului de putere, sunt bine cunoscute deoarece sunt prevăzute în timpul procesului de proiectare [8]. Cu toate acestea, un număr mare de parametri sunt impredictibili deoarece depind de instalarea efectivă a diferitelor aparate și de cablurile de conectare precum și de condițiile acestora de funcționare [9].

2. SISTEMUL ELECTROENERGETIC LA NAVE

Sistemele de alimentare ale navei necesită un nivel ridicat de fiabilitate, deoarece funcționarea lor este strâns legată de siguranța umană [10]. Utilizarea crescută a propulsiei electrice conduce la o capacitate crescută de generare instalată, la utilizarea diferitelor nivele de tensiune și, în general, la sisteme mai complexe.

Deoarece cererea de energie electrică este în mod obișnuit comparabilă cu capacitatea de generare iar sistemele de nave sunt izolate, devine evident că, în comparație cu sistemele terestre de alimentare cu energie electrică, aceste sisteme prezintă noi provocări [11].

Viitorul navelor electrice depinde de inovațiile radicale și de transformările arhitecturale din sistemele de electricitate ale navelor maritime. În cazul vehiculelor tradiționale, turbinele sau motoarele diesel acționează sau alimentează în mod direct energia sistemelor de propulsie, iar energia pentru alte sisteme ale vehiculelor provine de la priza electrică sau de la alte generatoare. Ideea unui sistem integrat de energie electrică (IPS) este tocmai pentru a permite întregii energii generate să fie utilizată la toate sistemele navei. De fapt, conceptele IPS anterioare au arătat că există suficientă energie în sistemul de propulsie pentru a furniza o necesitate tradițională a serviciului navei, permițând ca generatoarele de servicii destinate navelor să fie eliminate pentru economisirea semnificativă a combustibilului [12].

Trecerea de la propulsia mecanică la propulsia electrică a provocat schimbări dramatice în sistemele de alimentare ale navei. La navele tradiționale echipate cu sisteme de propulsie mecanică, energia electrică este generată la o tensiune scăzută, de obicei 400 V, 50 Hz sau 440 V, 60 Hz. În cazul navelor electrice (AES), electricitatea este generată la o tensiune mai mare cuprinsă între 3,3 și 11 kV (la 50 Hz sau 60 Hz) [13]. Deși, în conformitate cu standardele terestre de putere, aceste tensiuni sunt în gama de „tensiune medie”, în nave, acestea fiind denumite în mod obișnuit „tensiune înaltă” [14].

3. MODEL AL SISTEMULUI DE DISTRIBUȚIE

O atenție deosebită a fost acordată modelelor de întreruptoare electrice instalate în tabloul principal, cablurilor de linie MV și transformatorului de putere. Celelalte dispozitive, inclusiv rețeaua echivalentă în amonte de tabloul de distribuție, au efecte neglijabile asupra fenomenelor tranzitorii rapide care fac obiectul acestui studiu, deoarece generatoarele sincrone sunt caracterizate de o reactanță sincrone tranzitorie și subtransferă mai mare decât cablurile. Prin urmare, acestea pot afecta fenomene tranzitorii de frecvență joasă, dar nu afectează cantități mari de frecvență.

3.1. Tabloul principal. Studiul presupune ca tabloul principal să fie furnizat cu o rețea echivalentă de MV modelată care folosește un circuit Thevenin echivalent. După MV Busbar, fiecare linie este protejată de un întrerupător de circuit de vid tipic celui folosit în instalațiile de distribuție de tensiune medie.

Un model funcțional al întrerupătorului de circuit în vid a fost derivat din literatura internațională [15-18]. Modelul final (Figura 2) implementează următoarele caracteristici:

- (i) arc de rezistență atunci când este oprit;
- (ii) reaprinderea arcului când acesta este oprit;
- (iii) tăierea curentului când acesta este oprit;
- (iv) asincron de închidere și deschidere a celor trei poli.

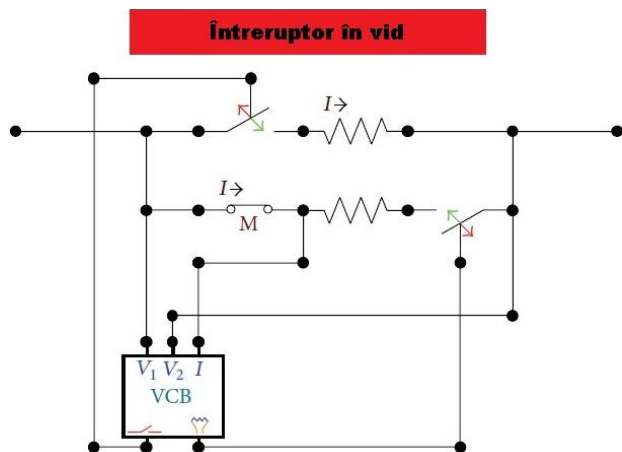


Fig. 2. Un model de întrerupător circuit de vid.

3.2. Sistemul de distribuție. Pentru cablurile de distribuție MV care conectează transformatorul de putere la tabloul principal, se utilizează un model de parametri localizați. Pentru a descrie mai bine comportamentul la cele mai înalte frecvențe, linia de cablu a fost subdivizată în mai multe secțiuni, fiecare având o lungime maximă de 10 m.

Pentru a descrie mai bine comportamentul la cele mai înalte frecvențe, linia de cablu a fost subdivizată în mai multe secțiuni, fiecare având o lungime maximă de 10 m. Modelul ia în considerare o linie trifazată formată din trei cabluri armate cu un singur miez, așezate într-un traseu de cabluri, așa cum se arată în Figura 3.

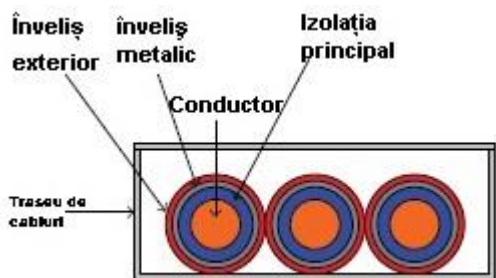


Fig. 3. Linia de alimentare cu MV instalată la bord.

În fiecare secțiune în linie sunt luate în considerare toate inductivitățile și capacitățile proprii și reciproce ale miezurilor și armăturii cablurilor.

Pentru a determina parametrii corecți pentru modelul în linie bazat pe inductanțele, rezistențele și capacitățile proprii și reciproce, a fost efectuată o analiză FEMM (Figura 4).

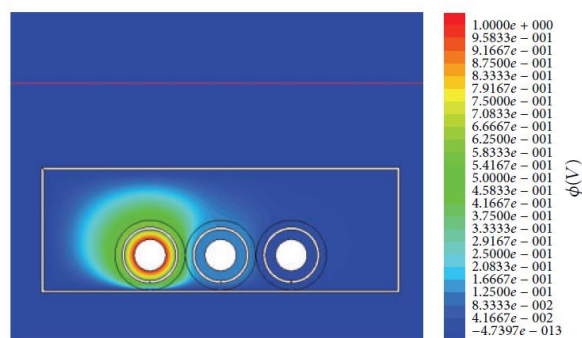


Fig. 4. O captură de ecran a analizei FEM pentru determinarea parametrilor.

4. ANALIZA CONFIGURAȚIEI CRITICE

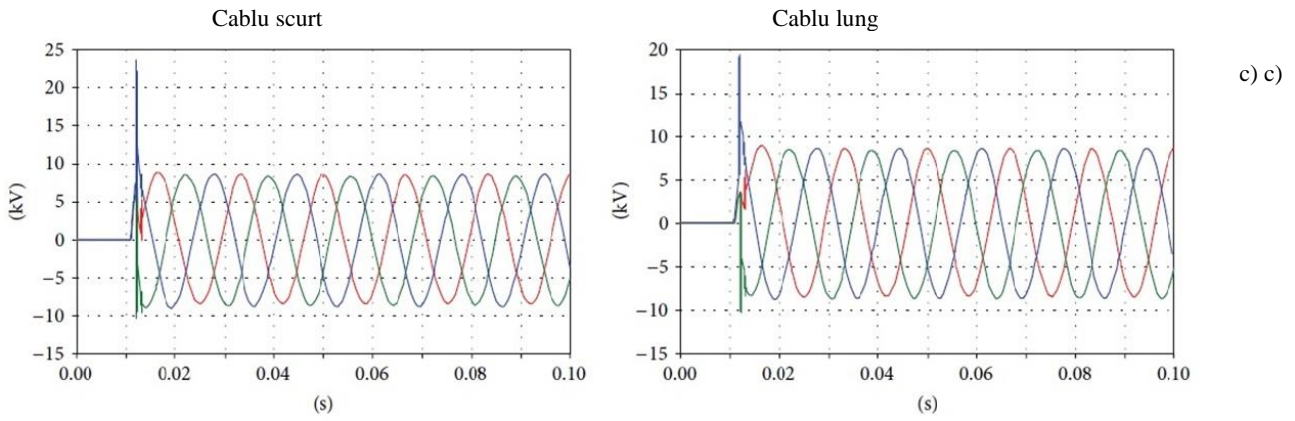
Pentru a evalua configurația critică a sistemului de distribuție la bord, este simulat un sistem de testare în mediul EMTP. Sistemul de testare este alcătuit dintr-un generator echivalent care alimentează tabloul de distribuție principal, un întrerupător de circuit în vid cu trei poli, o linie de cablu trifazată, un transformator de tensiune și un convertor de tensiune al mecanismului de acționare a motorului. Analiza se concentrează pe posibilele fenomene de rezonanță care pot apărea în timpul energizării sistemului de distribuție în condiții fără sarcină. În special, aceste fenomene pot apărea atunci când sunt furnizate încărcături inductive, cum ar fi transformatoare de tensiune sau motoare asincrone mari, prin linii lungi de cabluri.

Condiția de rezonanță depinde de valorile elementelor conservatoare care caracterizează sistemul de tensiune, incluzând capacitatea cablului și scurgerile transformatorului și inductanțele de magnetizare. Variația frecvenței naturale de oscilație datorate variației parametrilor de scurgere determină ce fenomene de rezonanță apar în interiorul transformatorului. Acestea pot include generarea supratensiunilor în timpul curentilor tranzitorii, cum ar fi pornirea sistemului în timpul fazei de energizare, mai ales dacă transformatorul este în stare fără sarcină, adică fără nici o amortizare datorate unei sarcini [19]. Prin urmare, a fost utilizat modelul detaliat al diferitelor componente prezentate mai sus.

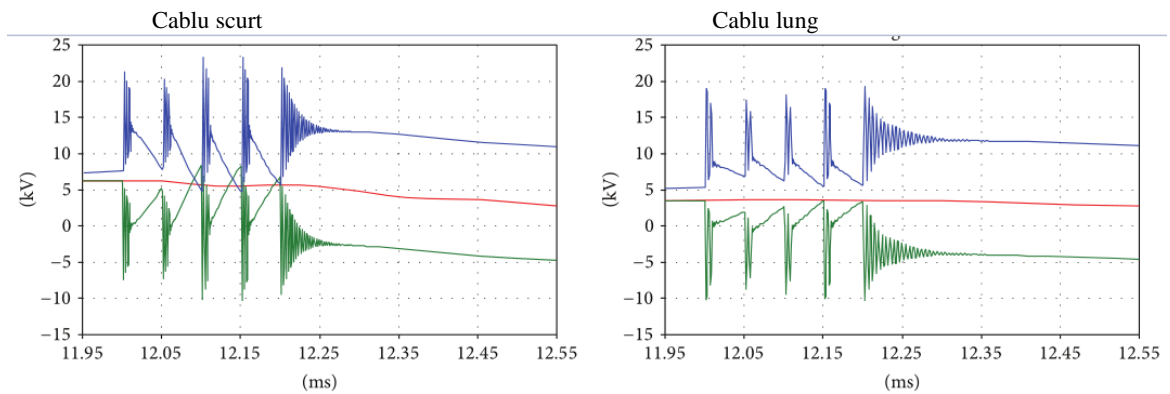
Pentru a evidenția relația dintre parametrii de scurgere și supratensiuni, energizarea sistemului de distribuție este studiată în detaliu și simulată pentru două lungimi de cablu care corespund cu două poziții diferite ale transformatorului. Sunt înregistrate tensiunile pe părțile primare și secundare pentru fiecare lungime.

Pentru o simulare mai realistă, are loc acționarea asincronă a celor trei contacte ale întrerupătorului de circuit în vid la 13 ms, 11.5 ms și 11 ms.

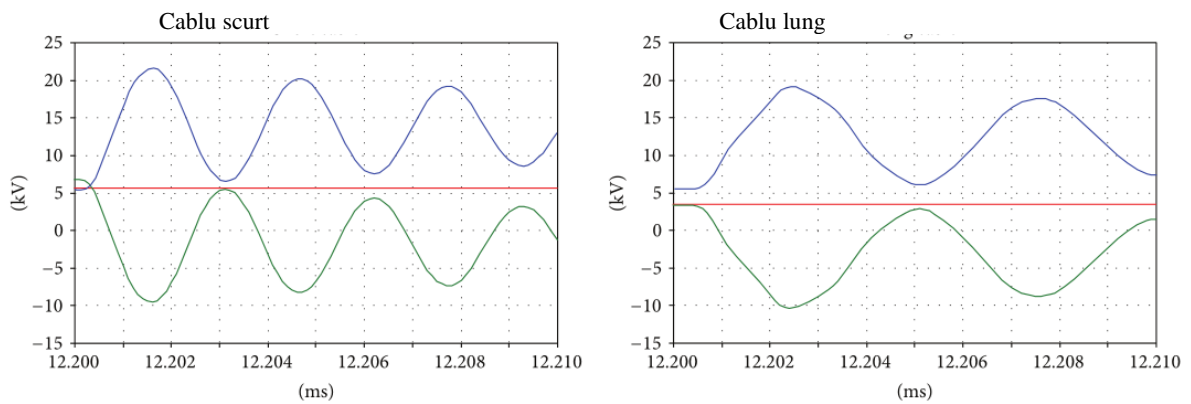
Rezultatele simulării sunt prezentate în figura 5(a,b,c,d).



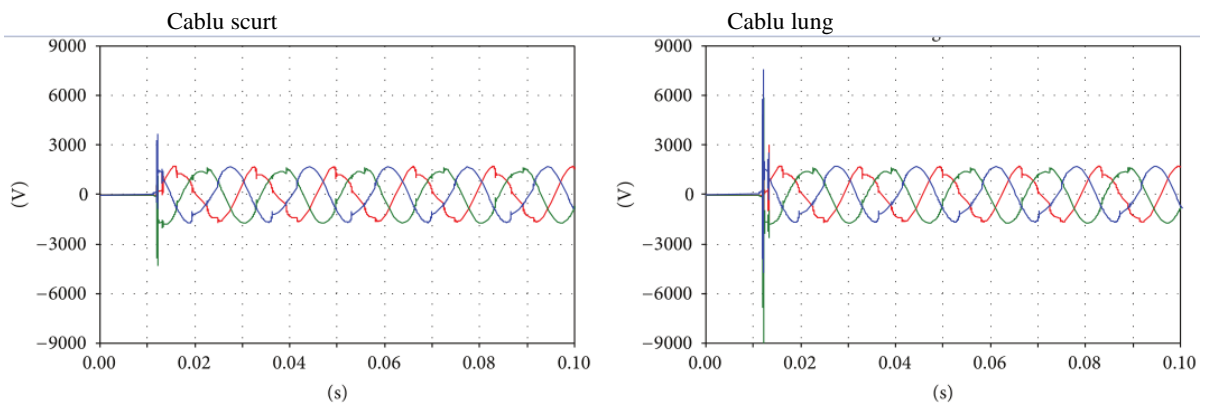
a) Tensiuni laterale primare în timpul rupturii.



b) Tensiuni parte principală: detaliu impuls de pornire.



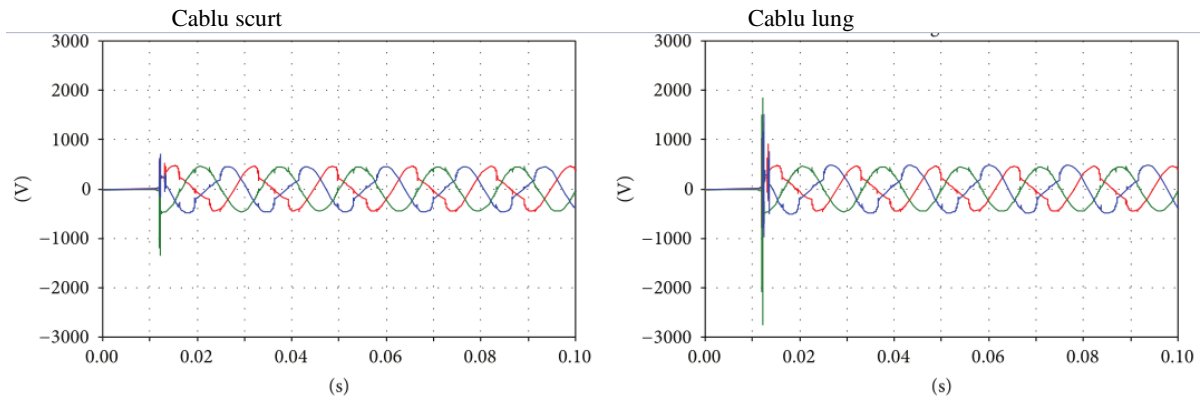
c) Tensiuni laterale principale: frecvența de oscilație tranzitorie în timpul impulsului de pornire.



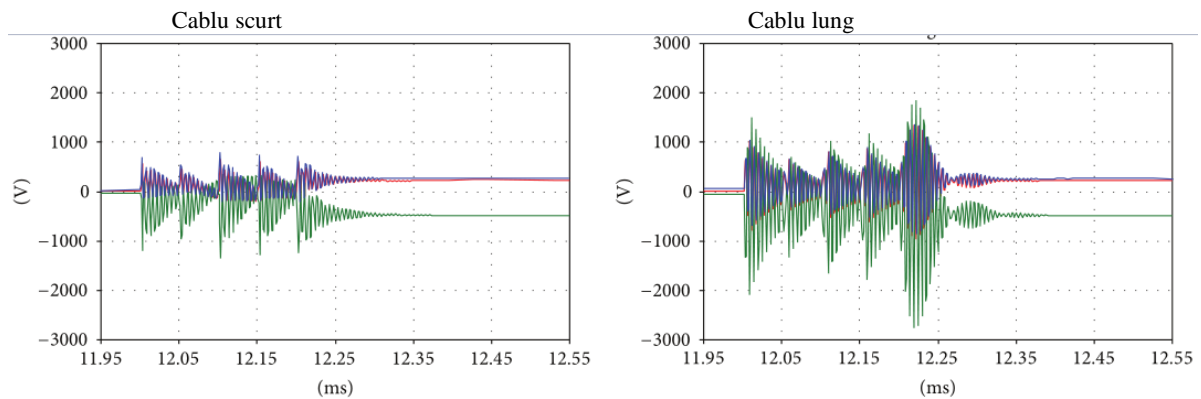
d) Tensiunile laterale secundare în timpul impulsului de pornire.

Fig. 5

STUDIUL FENOMENELOR TRANZITORII ÎN ECHIPAMENTELE NAVALE



a) Tensiunile bobinelor de racord în timpul impulsului de pornire.



b) Tensiunile tranzitorii în bobina de racord în timpul impulsului de pornire.

Fig. 6

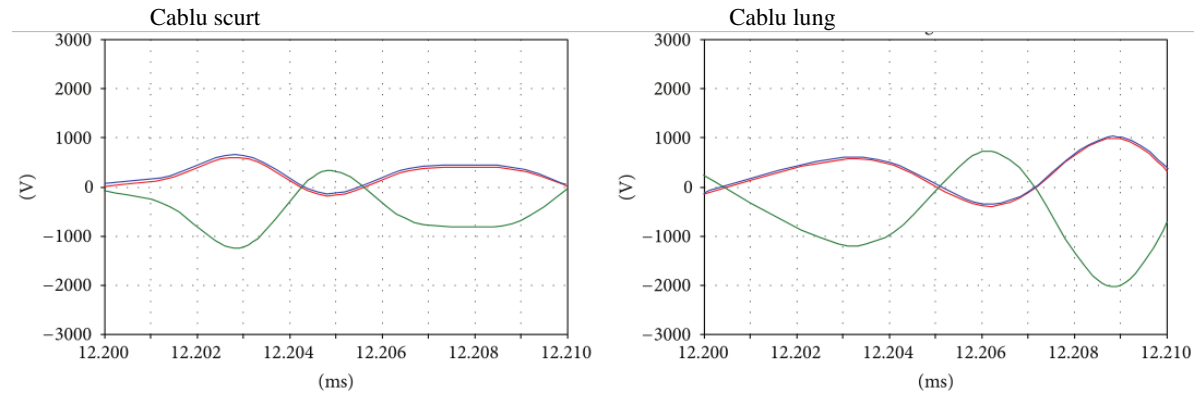


Fig 7: Detalii ale tensiunilor tranzitorii în bobina de racord în timpul impulsului de pornire.

Este de remarcat faptul că nu există diferențe în supratensiunile de pe partea primară, însă acest lucru nu este valabil pentru partea secundară. Schimbarea frecvenței naturale de oscilație poate provoca fenomene de rezonanță între părțile primare și cele secundare. În acest caz, în timpul impulsului de pornire, pot apărea supratensiuni ridicate și pot provoca stres ridicat asupra sistemului de izolare a cablurilor și transformatoarelor.

În particular, prin analiza comportamentului bobinei de avans (Figura 6), este posibil să se observe că variația frecvenței naturale de oscilație (Figura 7) produce fenomene tranzitorii care duc la supra-tensiuni de înaltă frecvență.

În timpul unei croaziere, configurația sistemului de alimentare se schimbă în mod continuu datorită variațiilor în cantitatea de tensiune cerută de utilizatori și de sistemul de propulsie. Prin urmare, numărul de ori în care o parte a sistemului este pornit sau oprit este mare, ceea ce supune bobinele secundare la vârfuri repetitive de înaltă tensiune care nu au fost prevăzute în faza de proiectare. De fapt, acestea depind de mulți factori nesiguri, inclusiv lungimile și căile cablurilor; prin urmare, pot fi evaluate numai după ce sistemul a fost construit.

Această solicitare continuă a izolației poate degrada proprietățile ce determină arcul electric în interiorul bobinelor și duce la distrugerea ulterioară a transformatorului.

5. CONCLUZII

În sistemele de energie izolate, necesitatea de echilibrare a sarcinii necesită multe reconfigurări ale sistemului și, în consecință, întreruptorul de circuit trebuie pornit și oprit de mai multe ori și, în anumite condiții, pot apărea supratensiuni tranzitorii datorate fenomenelor de rezonanță. O consecință critică a acestor probleme este posibilitatea unui pericol de incendiu, care prezintă probleme grave de siguranță, în special la bordul unei nave.

Deoarece au apărut efectiv daune la transformatoarele instalate pe nave de portcontainer, de croazieră, această lucrare vizează determinarea condițiilor care pot conduce la fenomene periculoase. Prin urmare, a fost creat și validat un model al unui sistem tipic de distribuție instalat pe o navă de croazieră, utilizând măsurători ale impulsurilor de pornire.

Mulțimea de simulări efectuate au determinat cele mai critice condiții, în special în ceea ce privește lungimile cablului de distribuție MV. De fapt, același sistem poate fi instalat într-o altă parte a navei, adică în secțiunea din față sau din spate, rezultând lungimi diferite ale cablurilor.

Modelul a fost util pentru a verifica faptul că supratensiunile care sunt prea mari pot apărea atunci când lungimea cablului variază de la cea a unui sistem binecunoscut. Rezultatele arată că este posibil ca fenomenele de rezonanță să conducă la supratensiuni ridicate repetitive, distrugând dispozitive precum transformatoarele și convertoarele de tensiune.

Odată ce apar aceste probleme, pot fi utilizate soluții diferite; de exemplu, este posibil a împărți un cablu în două conductoare paralele, a-i crește secțiunea transversală și a defini o altă cale.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Samoilescu Gheorghe, *Teză* „... Electromagnetic materials, Proceedings of Symposium F, pp. 77-85, ICMAT 2003
- [2] Q. Jiang, M. Xue și G. Geng, „Managementul energiei micro-rețelei în moduri conectate în rețea și de sine stătătoare,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, nr. 3, pag. 3380-3389, 2013.
- [3] G. F. Reed, B. M. Grainger, A. R. Sparacino și Z.-H. Mao, „Navă în rețea: concepte de curent continuu de tensiune medie în teorie și practică,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, nr. 6, pag. 70-79, 2012.
- [4] M. Brenna, F. Foiadelli, G. C. Lazaroiu și D. Zaninelli, „Harmonică analiza rețelei secundare de distribuție în sistemele navale,” în *Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP '12)*, pag. 541- 545, Hong Kong, iunie 2012.
- [5] G. K. Kasal și B. Singh, „Eliminarea armonică, controlul tensiunii și echilibrarea încărcării într-o generație izolată de energie,” *European Transactions on Electrical Power*, vol. 20, nr. 6, pag. 771-784, 2010.
- [6] Sucursala de Investigare a Accidentelor Maritime, „Raport privind investigarea eșecului catastrofal al unui condensator în sala de filtrare armonică posterioară la bordul RMS Queen Mary 2 în timp ce se apropia de Barcelona la 23 septembrie 2010,” Raportul Accidentului 28/2011, Sucursala de Investigare a Accidentelor Maritime, 2011.
- [7] K. L. Butler-Purry și N. D. R. Sarma, „Reconfigurarea automată pentru restaurarea sistemelor electrice de la bordul navelor,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, nr. 2, pag. 754-762, 2004.
- [8] T. D. Sudhakar și K. N. Srinivas, „Restaurarea rețelei energetice - studiu bibliografic,” *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, nr. 1, pag. 635-655, 2011.
- [9] L. Sainz, J. Clua și O. Jordi, „Modelarea încărcării pentru analiza armonicelor sistemului de alimentare în condiții dezechilibrate,” *European Transactions on Electrical Power*, vol. 11, nr. 1, pag. 49-56, 2001.
- [10] J. V. Amy Jr., „Considerații în proiectarea sistemelor navale de energie electrică,” în *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pag. 331-335, iulie 2002.
- [11] J. Prousalidis, E. Styvaktakis, E. Sofras, I. K. Hatzilau și D. Muthumuni, „Scăderea tensiunii în sistemele navale,” în *Proceedings of the IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS '07)*, pag. 309-314, 2007.
- [12] T. Ericson, „Ingineria ‚SIP electric total’,” în *Proceedings of the IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCJC '07)*, pag. 1-6, 2007.
- [13] J. F. Fuller, E. F. Fuchs și D. J. Roesler, „Influența armonicelor asupra protecției sistemului de distribuție a energiei electrice,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, nr. 2, pag. 549-557, 1988.
- [14] S. Quai, „Toate centralele de energie electrică pe navă: coordonarea dinamică între controale și protecții,” în *Proceedings of the 43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC '08)*, pag. 1-5, Padova, Italia, 2008.
- [15] M. Popov și L. Van der Sluis, „Compararea a două modele arc cu întrerupătoare de circuit în vid pentru comutarea a curentului mic inductiv,” în *Proceedings of the 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV '00)*, vol. 2, pag. 438-441, 2000.
- [16] L. C. Pinto și L. C. Zanetta Jr., „Aplicația modelului arc cu întrerupător de circuit SF6 de tensiune medie,” *Electric Power Systems Research*, vol. 53, nr. 1, pag. 67-71, 2000.
- [17] C. Vollet și B. de Metz-Noblat, „Modelul întrerupător de circuit în vid: cazul aplicării la comutarea motoarelor,” în *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST '07)*, Lyon, Franța, 2007.
- [18] U. Habedank și H. Knobloch, „Procedură pentru optimizarea întrerupătoarelor de circuit SF6,” *Euro Transaction on Electric Power*, vol. 2, nr. 5, pag. 315-320, 1992.
- [19] M. Brenna, F. Foiadelli, G. Sapienza și D. Zaninelli, „Calculul profilului tensiunii în rețele de distribuție sub operare sinusoidală și distorsionată,” în *Proceedings of the 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP '10)*, pag. 1-7, IEEE, Bergamo, Italia, septembrie 2010.

Despre autori

Ing. drd. **Robert – Ștefan MITREA**

CMA SHIPS Company – Academia Tehnică Militară, București,

Absolvent al Facultății de Inginerie Marină din cadrul Academiei Navale „Mircea Cel Bătrân” Constanța, promoția 2014. A absolvit în anul 2016 studiile universitare de masterat în cadrul aceleiași instituții de învățământ. În prezent lucrează în cadrul companiei CMA- CGM, în domeniul transportului maritim. Ocupă funcția de ofițer electrician la bordul navelor portcontainer.

Prof. univ. dr. ing. **Gheorghe SAMOILESCU**

Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța

Din anul 2007 este profesor universitar în cadrul Academiei Navale „Mircea Cel Bătrân”, ocupând de-a lungul anilor diverse funcții de conducere în managementul învățământului universitar și a cercetării în cadrul instituției. Deține o invenție, 4 premii pentru cărți în domeniul Știință și Tehnică, a scris 4 tratate și 24 cărți și peste 200 de articole publicate în revistele științifice sau comunicate la conferințe și simpozioane naționale și internaționale. Membru AGIR și vicepreședinte al Filialei AGIR Constanța, precum și membru al următoarelor asociații: SRPRNI, Asociația Internațională a inginerilor din Constanța de Mașini, IEEE, Asociația de Compatibilitate Electromagnetică din România, etc.