IOSUD - Universitatea Politehnica Timişoa
Şcoala Doctorală de Studii Inginereşti

INVESTIGAREA FUNCȚIONĂRII TURBINELOR HIDRAULICE ÎN REGIMURI TRANZITORII

Teză de doctorat – Rezumat (română)

pentru obținerea titlului științific de doctor la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul de doctorat ___Inginerie_Mecanica___

autor __ing. Sorin-Ioan LUPA__
conducători științifici ___ Dr.ing. Sebastian MUNTEAN, CS 1 ___
___ Prof. Emeritus, PhD. eng.,
Georges ABDUL-NOUR, UQTR, Canada

luna_septembrie_ anul_2026_

REZUMAT

În contextul actual, componența și caracteristicile sistemelor energetice s-au modificat semnificativ datorită integrării energiei electrice produse din surse regenerabile nedispecerizabile (eolian și solar) care au caracter fluctuant și imprevizibil. Din acest motiv, producția de energie electrică din hidrocentrale trebuie să asigure servicii de reglare/compensare a producției din surse regenerabile nedispecerizabile, prin funcționarea flexibilă pe o bandă largă de puteri și operarea frecventă în regimuri tranzitorii pentru reglajul frecvenței și asigurarea puterii în scopul echilibrării. Regimurile hidraulice tranzitorii asociate cu funcționarea flexibilă induc suprapresiuni care diminuează durata de viață a componentelor traseelor şi turbinelor hidraulice și pot chiar provoca defecțiuni structurale catastrofale.

Scopul tezei constă în identificarea şi analiza factorilor care influențează fenomenele hidrodinamice în regimuri tranzitorii, în special producerea loviturii de berbec, în vederea estimării impactului asupra siguranței în exploatare a componentelor turbinelor hidraulice și a durabilității traseelor hidraulice. Atingerea scopului definit mai sus se realizează prin elaborarea unei metodologii de colectare şi analiză a datelor înregistrate, urmată de evaluarea și clasarea impactului fiecărui scenariu de funcționare bazat pe rezultatele experimentale obținute in situ. Metodologia are în vedere studierea impactului diferitelor tipuri de legi de manevră utilizate la închiderea aparatului director asupra traseelor turbinelor hidraulice radial-axiale (Francis) și axiale (elice, Kaplan și saxo). Abordarea problematicii include trei etape: **(1)** stabilirea configurației de instalare a echipamentelor de măsură in situ, procedura de achiziție și analiza datelor experimentale înregistrate; **(2)** analiza consecințelor legii de închidere asupra siguranței în exploatare; **(3)** estimarea impactului scenariilor de operare asupra duratei de viață a turbinelor hidraulice.

În **Capitolul 1** este introdusă tema de cercetare: studiul fenomenelor tranzitorii asociate unei exploatări flexibile a hidroagregatelor și impactul pe care acest mod de operare îl are asupra siguranței în exploatare a turbinelor hidraulice.

Selectarea acestei teme de cercetare a fost făcută din perspectiva problematicii actuale a suprasolicitărilor hidroagregatelor pentru echilibrajul rețelelor.

Capitolul 2 prezintă o analiză critică a literaturii de specialitate în domeniul funcționării turbinelor hidraulice în regimuri tranzitorii, din care a rezultat că legea de închidere a aparatului director are o influență decisivă asupra siguranței în exploatare a turbinelor hidraulice. Analizele din literatură sunt în mare măsură particulare, rezultatele studiilor rămân adesea la nivel teoretic, iar obiectivele nu sunt axate pe dezvoltarea unor strategii de mentenanță care să ghideze intervențiile legate de funcționarea în siguranță. Măsurile preconizate de autori sunt punctuale și nu vizează o aplicabilitate directă și pe scară largă a recomandărilor în mediul industrial.

Capitolul 3 este expusă metodologia de cercetare folosită pentru investigarea suprapresiunilor din traseele turbinelor hidraulice, impactul suprapresiunilor asupra siguranței în exploatare și a durabilității camerei spirale. Principalele elemente ale metodologiei incluse în următoarele capitole sunt: (i) un studiu experimental și o analiză a datelor obținute (Capitolele 4 și 5); (ii) o analiză a consecințelor legii închiderii asupra siguranței în exploatare (Capitolul 6); (iii) o estimare a impactului scenariilor de funcționare a hidroagregatelor asupra duratei de viață (Capitolul 7); (iv) o strategie de transfer al rezultatelor și concluziilor studiilor experimentale către industrie (Capitolul 8).

Într-o primă etapă, în **Capitolul 4**, este investigată evoluția in situ a suprapresiunilor produse de închiderea aparatului director în timpul aruncărilor de sarcină ale turbinei hidraulice. Testele au fost efectuate, cu precădere, pentru închiderea de urgență a aparatului director, în cazul aruncărilor de sarcină progresive. Investigațiile constau în studierea legilor de manevră ale aparatului director în funcție de tipul de turbină hidraulică (Francis, elice, Kaplan și saxo) și impactul asupra siguranței în exploatare a componentelor turbinei şi a traseului hidraulic asociat. Programul de colectare a datelor experimentale a prevăzut utilizarea de gradienți diferiți de închidere a aparatului director, iar tendințele în suprapresiune sunt grupate și comparate, în funcție de configurațiile turbinelor hidraulice considerate. Au fost înregistrate suprapresiunile obținute în regimuri tranzitorii, în porțiunea de traseu hidraulic amonte și aval de rotorul turbinei. O

atenție specială este acordată suprapresiunilor obținute în camera spirală a turbinei hidraulice. Este realizată analiza și interpretarea datelor experimentale pentru 24 de turbine hidraulice cu puteri cuprinse între 4 MW și 360 MW și traseele acestora, care echipează centrale hidroelectrice în operare, unele dintre ele proiectate în urmă cu mai bine de un secol. Concluziile sunt sintetizate în cadrul unor tendințe pe grupuri în funcție de tipul şi caracteristicile turbinei hidraulice și ale traseului asociat. De asemenea, este analizată influența parametrilor legii de manevră asupra supraturației hidroagregatelor, precum și impactul simultan asupra binomului suprapresiune/supraturație. Rezultatele experimentale au arătat că parametrii legii de închidere ai aparatului director au un impact decisiv asupra siguranței în funcționare, iar consecințele diferă de la o configurație la alta. De exemplu, utilizarea unei pante de închidere de 3 ori mai lente pentru o turbină Kaplan decât pentru o turbină Francis (30 sec/100%WG față de 10 sec/100%WG) provoacă totuși creșteri ale suprapresiunii peste presiunea de referință de până la 5 ori mai mari (25% față de 5%). Acest tip de comportament necesită o abordare detaliată prin studii de caz particulare pentru turbine Francis și Kaplan, care sunt realizate în capitolul 5.

Prin intermediul unui studiu de caz considerat pentru o turbină hidraulică de tip Francis, în **Capitolul 5**, este analizată interacțiunea temporală dintre factorii care produc lovitura de berbec în camera spirală. Utilizând un model teoretic bazat pe configurația existentă a unui hidroagregat echipat cu turbină Francis, este realizat un calcul analitic al suprapresiunilor, și evoluția presiunii în timp în camera spirală pe baza simulării numerice. Compararea valorilor presiunilor maxime obținute analitic și numeric cu datele experimentale a condus la validarea metodelor utilizate și la identificarea limitelor acestora. S-a constatat că un calcul analitic poate subestima datele experimentale cu aproximativ 7% în timp ce rezultatele numerice supraestimează datele experimentale în limita a 2%. În concluzie, utilizarea calculului analitic în proiectare este susceptibilă de a introduce un grad de risc pentru siguranța în funcționare a unei turbine hidraulice datorită faptului că este foarte sensibil la ipotezele simplificatoare utilizate. Prin urmare este recomandată folosirea metodei analitice doar pentru estimarea în timp real a ordinului de mărime al suprapresiunilor (în timpul testelor), în timp ce pentru

proiectare (studii de tranzitorii) este recomandată metoda de simulare numerică.

În continuare, este aprofundat impactul legii de manevră asupra suprapresiunilor induse de fenomenul de lovitură de berbec în traseul hidraulic, la hidroagregatele echipate cu turbine axiale cu dublu reglaj. Pentru un studiu de caz de turbină Kaplan, au fost efectuate investigații pentru determinarea presiunii maxime când este selectată o lege de închidere a aparatului director cu o pantă rapidă pe toată cursa aparatului director, comparativ cu presiunea maximă produsă de o lege de închidere cu două pante, un rapidă urmată de o închidere lentă. Studiul comparativ evidențiază faptul că o lege de închidere a aparatului director cu pantă dublă, poate asigura o limitare a suprapresiunilor în turbinele hidraulice axiale cu dublu reglaj pentru a nu compromite integritatea structurală a traseului hidraulic. De asemenea, se arată că prin alegerea corespunzătoare a gradienților de închidere a aparatului director, se poate asigura un echilibru între suprapresiunea și supraturația rezultate în timpul aruncărilor de sarcină. Analiza datelor experimentale pentru o turbină Kaplan evidențiază amplificarea suprapresiunilor rezultate în lipsa pantei lente (cu 11% la 78%) și creșterea solicitărilor produse de absența celei de a doua pante a legii de închidere a aparatului director. În cazul turbinelor hidraulice de tip saxo cu dublu reglaj, sunt analizate limitările impuse de utilizarea unei pante unice rapide pe toată cursa aparatului director, precum și impactul gradientului de închidere unic asupra binomului suprapresiune/ supraturație. Studiul a evidențiat necesitatea utilizării unei legi de închidere a aparatului director cu pantă dublă pentru a asigura siguranța în exploatare a unei turbine axiale cu dublu reglaj. În cazul utilizării unei legi de manevră cu o pantă unică rapidă, există un risc real de depășire a presiunii admisibile. În studiul de caz abordat, presiunea maximă extrapolată de 212% depășește cu mult presiunea admisibilă de 125% și chiar presiunea de rupere a conductei de 200%. Acest aspect este analizat în detaliu în capitolul următor dedicat impactului legii de închidere asupra siguranței în exploatare a turbinelor hidraulice.

<u>În a doua etapă</u>, în **Capitolul 6**, este analizat impactul legii de închidere asupra siguranței în exploatare a turbinelor hidraulice produse de suprapresiunile generate de lovitura de berbec în traseul hidraulic. Studiile de caz abordate pentru turbinele Francis și Kaplan evidențiază că, respectarea presiunii admisibile a

traseului hidraulic este o condiție absolut necesară, pentru a evita o distrugere catastrofală a conductei. Pentru limitarea suprapresiunilor, s-a elaborat o metodologie de ajustare a legii de închidere a aparatului director pe baza unei serii de teste de aruncări de sarcină progresive. În primul rând, este descrisă metodologia de stabilire a gradienților de închidere în raport cu suprapresiunile generate de lovitura de berbec în camera spirală iar apoi, în raport cu supraturația maximă a hidroagregatului. Această metodologie este utilă operatorilor de turbine hidraulice, în special în etapa de punere în funcțiune a turbinelor hidraulice.

De asemenea, este analizat cazul concret al accidentului catastrofal survenit în 2009 la CHE Sayano-Shushenskaya din Rusia, care s-a produs pe fondul nerespectării criteriilor de proiectare ale turbinei hidraulice (închiderea aparatului director cu o viteză foarte mare: 4.1 sec/100%WG, comparativ cu aproximativ 11.0 sec/100%WG întâlnită în mod curent pentru acest tip de turbină) și a modului de exploatare (utilizarea intensivă a hidroagregatului în reglaj de rețea cu exploatarea frecventă în zone cu regim tranzitoriu). Elementul declanșator al accidentului identificat in cercetările mele, a fost suprapresiunea generată de lovitura de berbec, care a depășit presiunea admisibilă. Analiza datelor disponibile pentru acest accident a conturat recomandările de exploatare în siguranță a turbinelor hidraulice. Pe baza investigațiilor realizate, evenimentul declanșator al accidentului a fost suprapresiunea generată de lovitura de berbec, care a depășit presiunea admisă. În concluzie, suprapresiunile generate de gradienții de închidere superiori valorilor care garantează respectarea presiunii admisibile pot avea efecte catastrofale asupra siguranței în funcționare a turbinelor hidraulice. De aceea, impactul modului de exploatare a turbinei hidraulice asupra durabilității componentelor sale și ale traseului hidraulic respectiv asupra siguranței în exploatare este tratat în capitolul următor.

În a treia etapă, rezultatele analizei datelor experimentale sunt utilizate pentru a stabili strategii concrete de transfer a măsurilor de atenuare ale efectelor solicitărilor către operatorii de turbine hidraulice. În **Capitolul 7**, este evaluat impactul solicitărilor ciclice induse în traseul hidraulic la funcționarea în regimuri tranzitorii. Utilizând metodologia curbelor S-N este stabilită, pentru fiecare dintre solicitările considerate, o relație conceptuală cu durata de viață a unei camere

spirale mecano-sudate. Pentru a estima impactul ansamblului solicitărilor asupra durabilității camerei spirale, rezultatele sunt transpuse pentru diverse scenarii de operare a turbinelor hidraulice utilizate în mod curent în practica de exploatare. Folosind estimări analitice, se determină că cel mai mare impact asupra durabilității camerei spirale îl au traversările regimurilor tranzitorii, urmate de secvențele de pornire/oprire. De asemenea, o exploatare intensivă a turbinelor hidraulice pentru reglajul rețelei electrice poate conduce la o reducere a duratei de viață cu până la 54%. Studiul a evidențiat că îmbătrânirea prematură a traseelor hidraulice se datorează solicitărilor ciclice generate de secvențele de exploatare ale hidroagregatului. În concluzie, modul de operare al turbinei hidraulice are un impact determinant asupra siguranței în exploatare. De aceea, alegerea şi implementarea unui program/sistem de inspecție şi mentenanţă care să asigure siguranța în exploatare a turbinei hidraulice ș a componentelor sale este crucial. Problemele legate de programul/sistemul de inspecție şi mentenanţă a componentelor turbinei hidraulice/traseului sunt tratate în capitolul următor.

Rezultatele privind impactul solicitărilor ciclice sunt utilizate în **Capitolul 8** la elaborarea de strategii pentru transferul rezultatelor și concluziilor către industrie. Pentru obținerea unui tablou centralizator al acțiunilor de intervenție, este propusă o metodologie bazată pe combinarea unei matrici de risc cu o matrice de diminuare a efectelor solicitărilor. Clasificarea turbinelor hidraulice și a traseelor existente în categorii de intervenție permite luarea de decizii și alegerea măsurilor, în funcție de solicitările generate de diferitele moduri de exploatare. Abordarea consideră ansamblul etapelor din viața unui proiect: proiectare, punere în funcțiune, exploatare, mentenanță și retehnologizare a unei turbine hidraulice. Metodologia prezentată permite luarea în considerare simultană a impactului suprapresiunilor asupra funcționării în siguranță a traseului hidraulic, cu încadrarea ansamblului turbină hidraulică/traseu într-o categorie de program de mentenanță. Ca o materializare a concluziilor și rezultatelor experimentale, sunt propuse o serie de măsuri specifice pentru asigurarea funcționării în siguranță a turbinelor hidraulice și metode generale de îmbunătățire a mentenanței. În mod particular, pentru intervențiile de mentenanță, este propusă trecerea de la procedura clasică, periodică și corectivă, la o mentenanță preventivă, bazată pe indicatori funcționali

relativi, rezultați din monitorizarea parametrilor de funcționare. Metodologia de completare a programului de mentenanță cu un studiu de risc permite luarea în considerare simultană atât a măsurilor specifice pentru funcționarea în siguranță, cât și a soluțiilor pentru creșterea duratei de viață a turbinei și a traseului hidraulic. Totodată, prin combinarea concluziilor analizelor experimentale din capitolele anterioare cu o structurare a programelor de intervenție în funcție de necesități și starea de degradare, rezultă o abordare pragmatică din punctul de vedere al personalului de exploatare din centrale.

Principala realizare a tezei constă în abordarea sistematică a operării turbinelor hidraulice în regimuri tranzitorii și estimarea impactului asupra siguranței în exploatare bazată pe experiența câștigată în cei 15 ani de proiectant al turbinelor hidraulice la Alstom/GE Hydro, Canada și 11 ani de exploatare/testare a turbinelor hidraulice la Hydro-Quebec, Canada.

Investigațiile se bazează pe analiza și interpretarea datelor experimentale pentru peste 1000 de aruncări de sarcină individuale efectuate pe 24 de configurații cu turbine hidraulice de tip Francis, elice, Kaplan și saxo cu puteri cuprinse între 4 MW și 360 MW și traseele acestora.

Metodologia utilizată a condus la centralizarea evoluției suprapresiunilor măsurate și crearea unei diagrame sinoptice a turbinelor hidraulice studiate, cu specificarea parametrilor legii de închidere a aparatului director și cu evaluarea contribuției factorilor care generează lovitura de berbec. Studiile de caz și analizele comparative au permis stabilirea unor corelații între diverse tipuri de legi de închidere a aparatului director și siguranța în funcționare. Prin calcule analitice, legăturile dintre parametrii legii de închidere și impactul asupra siguranței în exploatare au fost teoretizate.

Concluziile privind durabilitatea și siguranța în exploatare au fost integrate în cadrul unei strategii de transfer a rezultatelor studiilor experimentale către industrie, luând în considerare simultan factorii de risc și activitățile de mentenanță în funcție de parametrii operaționali preconizați pentru turbina hidraulică.

Rezultatele investigațiilor experimentale și a analizelor teoretice prezentate în teză prefigurează o serie de perspective de continuare a cercetărilor în direcția suprapresiunilor și anume: (i) selectarea parametrilor legii de închidere a aparatului

director (număr de pante, gradient, poziția punctelor de conexiune a pantelor) în funcție de tipul turbinei şi constrângerilor specifice fiecărui hidroagregat din centralele hidroelectrice; (ii) soluții de limitare a supraturației părții rotitoare a turbinei hidraulice (valoarea maxima, momentul producerii, durata "platoului de supraturație") pentru a creste siguranța in exploatare.