

ANALIZA CÂMPULUI HIDRODINAMIC LA INTRAREA ÎN ROTORUL POMPELOR CENTRIFUGE DE ACUMULARE, LA TURAȚIE VARIABILĂ

Rezumat

ing. Ionel Aurel Drăghici

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Liviu Eugen Anton
prof.univ.dr.ing. Anton Anton
prof.univ.dr.ing. Romeo Susan-Resiga
CS1.dr.ing. Sebastian Muntean

Ziua susținerii tezei: 27.03.2015

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Mașini Mecanice, Utilaje și Transporturi, Catedra de Mașini și Sisteme Hidraulice și Pneumatice din cadrul Universității „Politehnica” din Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat Domnului Profesor Doctor Inginer Liviu Eugen ANTON pentru îndrumarea și sprijinul acordat pe întreg stagiul doctoral. De asemenea sincere mulțumiri se cuvin colectivului de la Catedra de Mașini Hidraulice, în special membrilor comisiei de îndrumare în cadrul tezei de doctorat Prof. Dr. Ing. Alexandru BAYA, Conf. Dr. Ing. Teodor MILOȘ și Ș.L. Dr. Ing. Adrian STUPARU pentru sprijinul oferit pe parcursul stagiului doctoral. Sincere mulțumiri se cuvin Domnului CS1 Dr. Ing. Sebastian MUNTEAN membru al Academiei Române-Filiala Timișoara și al Centrului de Cercetare în Ingineria Sistemelor cu Fluide Complexe (CCISFC), pentru observațiile și sprijinul necondiționat acordate în timpul stagiului doctoral. De asemenea țin să mulțumesc colegilor din cadrul CCISFC, în special Domnului Prof. Dr. Ing. Romeo SUSAN-RESIGA pentru sfaturile acordate și Asist. Dr. Ing. Alin BOSIOC pentru ajutorul acordat la îndeplinirea stagiului doctoral. Nu în ultimul rând aș vrea să mulțumesc colegului și prietenului Dr. Ing. Gheorghiță Gînga pentru susținerea acordată.

Țin să amintesc că achiziționarea unor echipamente de măsură performante care au făcut ca investigațiile experimentale efectuate să fie comparabile cu cele efectuate în marile centre de cercetare internaționale a fost posibilă datorită colaborării cu S.C. Hidroelectrică S.A. Sucursala Hidroelectrică Râmnicu-Vâlcea în proiectul cu titlul “Cercetări și experimentări privind îmbunătățirea performanțelor energetice și cavitaționale ale pompelor PRO 10-195 de la SP Jidoaia”, etapa I-a contract nr. 97-113.03/16.10.2008, etapa a II-a contract nr. 72-113.03/05.11.2009, etapa a III-a contract nr. 175/30.12.2010, Beneficiar S.C. Hidroelectrică – Sucursala Râmnicu Vâlcea, Director proiect Prof.dr.ing. Liviu Eugen ANTON.

Teza de doctorat a fost parțial finanțată prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane POSDRU/159/1.5/S/137516 finanțat din Fondul Social European și de Guvernul României.

Timișoara, Martie 2015

Ing. Ionel Aurel Drăghici

ANALIZA CÂMPULUI HIDRODINAMIC LA INTRAREA ÎN ROTORUL POMPELOR CENTRIFUGE DE ACUMULARE, LA TURAȚIE VARIABILĂ

Rezumat

Prezenta lucrare de doctorat se înscrie în tematica actuală de îmbunătățire a proiectării și exploataării turbomașinilor de mare putere, tratând comportamentul hidrodinamic al turbopompelor la turație variabilă.

Scopul principal al tezei de doctorat îl reprezintă analiza câmpului hidrodinamic la intrarea în rotorul pompelor centrifuge de acumulare de capacitate mare, la turație variabilă. Specific acestor pompe de capacitate mare este prezența la aspirație a unui cot cu o geometrie complexă 3D. În interiorul cotului de la aspirație, cazul de față, structura curentului este una complexă. La debite mari de funcționare, acest cot generează vârtejuri, dintre care două sunt dispuse în spatele arborelui acestea fiind vizualizate atunci când presiunea în stand scade suficient. Aceste vârtejuri sunt transportate în rotorul pompei. Consecința majoră a acestor fenomene hidrodinamice asupra funcționării pompei de acumulare o reprezintă dezvoltarea fenomenului de cavitație. Prezența fenomenului de cavitație generează la rândul lui diminuarea performanțelor energetice ale pompei, vibrații și zgomot, erodarea și chiar ruperea unor bucăți de material din paleta rotorică.

În capitolul 2 sunt prezentate măsurătorile globale (energetice și cavitaționale) realizate pe un rotor la scară 1:5.7 cu cel din SP Jidoaia și pe un rotor nou proiectat de către Dr.ing. Gînga G. Cele două rotoare au fost analizate atât fără, cât și echipate cu un rotor axial premergător (impulsor) proiectat de către Dr.ing. Moisa I. Toate măsurătorile au fost realizate la 4 valori ale turației (1500, 2000, 2500 și 3000 rpm) și la 7 regimuri de debite între 15 l/s și 45 l/s cu un pas de 5 l/s. În urma măsurătorilor am trasat curbele energetice (înălțime de pompare, putere absorbită și randament funcție de debit) și curbele cavitaționale (NPSH funcție de debit). Am realizat un număr de 16 regimuri pentru măsurătorile energetice și un număr de 91 regimuri pentru măsurătorile cavitaționale.

Din punct de vedere energetic: folosirea rotorului axial are o influență neglijabilă asupra caracteristicilor energetice pentru toate turațiile investigate, pentru ambele rotoare. Pentru fiecare turație investigată randamentul celor două rotoare este aproximativ același, dar diferă debitul realizat de fiecare rotor la randamentul maxim. Rotorul nou proiectat realizează un debit cu aproximativ 7% mai mare la randamentul maxim la toate turațiile investigate.

Din punct de vedere cavitațional: folosirea rotorului axial aduce o îmbunătățire importantă a comportamentului cavitațional în zona de funcționare pentru ambele rotoare investigate pe toată plaja de turații analizată.

În urma acestor rezultate, soluția practică cea mai viabilă de îmbunătățire a comportamentului cavitațional al pompelor din SP Jidoaia este folosirea unui rotor axial în fața rotorului de pompă, sau cum mai este cunoscut în literatură ca impulsor.

În capitolul 3 sunt prezentate rezultatele măsurătorilor câmpului de viteză neuniform obținut în urma investigațiilor cu LDV în secțiunea circulară de ieșirea din

cotul de la aspirație al pompelor de capacitate mare. Datorită geometriei 3D a cotului de la aspirație, la intrarea în pompă am măsurat neuniformitățile câmpului hidrodinamic. Pentru a determina câmpul de viteze la intrarea în rotor, am realizat măsurători cu LDV la turație și debit variabil în 19 axe radiale de măsură. Aceste 19 axe sunt cuprinse între $\pm 90^\circ$ în semi-planul superior. Pe fiecare axă am măsurat în 62 de puncte. Turațiile investigate sunt 1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm și 2900 rpm; iar debitele investigate sunt 0.5, 0.6, ..., 1.3 * Qnom unde Qnom = 33.5 l/s. Volumul de măsurători cu LDV a cuprins un număr total de 551 regimuri, pentru fiecare regim am aplicat procedura de măsură ce a durat aproximativ 1 oră. Sistemul LDV permite măsurarea simultană a două componente ale vitezei, viteza axială și viteza tangențială. În urma măsurătorilor se trag următoarele concluzii:

- În urma analizei componentelor adimensionale ale vitezei se observă o variație mică a vitezei axiale adimensionale de aproximativ 10% față de medie în timp ce viteza tangențială adimensională are o variație semnificativă cuprinsă între -50% și +30% față de medie pentru semiplanul superior măsurat cu LDV la intrarea în pompă.
- În urma analizei unghiului curentului (γ) determinat față de direcția axei mașinii, am obținut o variație semnificativă a acestuia cuprinsă între $\pm 33^\circ$ la butuc și $\pm 38^\circ$ la carcasă pe întreaga circumferință la ieșirea din cot pentru o rotație completă de 360° .
Am observat că unghiului curentului (γ) nu variază cu debitul la cele pentru turații investigate excepție făcând zona de $+10^\circ \dots +40^\circ$ unde există o mică variație cu creșterea debitului.

Aceste neuniformități ale debitului sunt generate de cot și sunt preluate de rotor, ducând la efecte nedorite în funcționare cum ar fi comportament cavitațional al pompei. Deoarece în literatură am avut disponibile numai rezultate numerice, am realizat în premieră aceste măsurători care le confirmă pe primele.

Dacă prin măsurătorile cu LDV prezentate în capitolul 3 am obținut câmpul de viteză staționar, în capitolul 4 am extins măsurătorile și la câmpul de presiune nestaționar. Aceste măsurători au fost efectuate pentru 36 de regimuri la ieșirea din cot, la turație variabilă respectiv 3000, 2900, 2800 și 2700 rpm, și la debit variabil cuprins între 0.5, 0.6, ..., 1.3*Qnom unde Qnom=33.5 l/s.

În transformata Fourier a semnalului am identificat frecvențele fundamentale ale rotorului. Frecvențele pulsațiilor de presiune datorate recirculărilor fluidului la intrarea în pompă se regăsesc în intervalul 0 Hz - prima frecvență fundamentală a rotorului. Cea mai înaltă amplitudine din acest interval reprezintă frecvența dominantă a semnalului. Din graficele realizate la cele 4 turații investigate pentru frecvența dominantă se observă că aceasta scade cu creșterea debitului. Pe baza măsurătorilor am determinat coeficientul de cavitație (σ) și dependența frecvenței fundamentale față de acesta. Din analiza valorilor rezultă că atât frecvența cât și coeficientul de cavitație (σ) sunt direct proporționale cu presiunea medie de la ieșire din cot. Concluzia finală pentru frecvența dominantă este dependența de debit și independența de turație. În urma prelucrării rezultatelor obținute din măsurătorile cu senzori piezorezistivi am prezentat faptul că amplitudinea echivalentă are aceeași alură cu datele cunoscute din literatură și că amplitudinea echivalentă adimensională este dependentă de debit și independentă de turație.

Câmpul de presiune nestaționar la intrarea în rotorul pompei este generat de cot și este dependent de debit și independent de turație.

În capitolul 5 am realizat simularea numerică a curgerii turbulente 3D cuplate rotor+colector. Prima etapă a constat în stabilirea domeniilor de analiză și impunerea condițiilor la limită pe frontiere. Simulările numerice 3D staționare în rotorul+colectorul model al pompei de acumulare s-au realizat la turația de 3000 rpm și la cinci debite de funcționare, și anume: $0.8 \cdot Q_{nom}$, $0.9 \cdot Q_{nom}$, $1 \cdot Q_{nom}$, $1.1 \cdot Q_{nom}$ și $1.2 \cdot Q_{nom}$, unde $Q_{nom} = 33.5$ l/s. În urma simulărilor numerice ce au luat în considerare neuniformitatea de la intrarea în pompă, am demonstrat variația unghiului curentului pe paletel rotorului la o rotație completă. Acest fenomen are ca și efect obținerea presiunii statice minime în vecinătatea bordului de atac pe fața de depresiune, pentru trei paletel rotorice dispuse în semiplanul inferior. La o rotație completă a rotorului, pe fiecare paletă se generează zona de presiune statică minimă, care dispare în zona cu presiune mai ridicată din semiplanul superior.

De asemenea, am determinat și prin calcul pe baza simulărilor numerice, performanțele energetice ale rotorului model de pompă de acumulare care le-am comparat cu datele obținute pe cale experimentală. Rezultatele numerice obținute pentru comportamentul energetic prin metoda cuplării rotor+colector sunt corelate cu datele experimentale, erorile fiind de aproximativ 4-11% pentru înălțimea de pompare și de aproximativ 0-3% pentru randamentul hidraulic. Această corelare bună între rezultatele numerice și datele experimentale provine din luarea în calcul a neuniformității câmpului de viteză la intrarea în rotor, precum și din transferul integral al câmpurilor de viteză și de presiune între rotor și colector.

În baza analizei literaturii de specialitate și a investigațiilor experimentale și numerice realizate în cadrul tezei au rezultat mai multe soluții pentru îmbunătățirea comportamentului cavitațional al pompelor de mare capacitate:

- a) Reproiectarea rotorului pompei;
- b) Instalarea unui rotor axial premergător;
- c) Reproiectarea geometriei cotului de la aspirație;
- d) Instalarea unor paletel statorice de dirijare a curentului de la aspirație;
- e) Instalarea unor dispozitive de recirculare a curentului dintre cot și rotor la debite parțiale.

Dintre acestea, am demonstrat că soluția cea mai fezabilă din punct de vedere tehnico-economic este realizarea rotorului axial premergător.

Contribuțiile personale sunt prezentate în cele ce urmează:

- Am stabilit pe baza măsurătorilor energetice și cavitaționale la 107 regimuri, necesitatea implementării unui rotor axial în fața rotorului pompei cu cot la aspirație pentru îmbunătățirea comportamentului cavitațional.
- Am măsurat câmpul de viteză neuniform la intrarea în rotorul pompelor centrifuge de capacitate mare produs de cotul de la aspirație. Am realizat 551 de regimuri. Componentele măsurate cu metoda LDV sunt: viteza axială și viteza tangențială.
- Am evaluat mărimile ce caracterizează câmpul de presiune neuniform la ieșirea din cotul de la aspirație al pompelor centrifuge de capacitate mare. Cele două mărimi analizate sunt frecvența dominantă și amplitudinea echivalentă.
- Pe baza măsurătorilor am determinat coeficientul de cavitație și dependența frecvenței fundamentale funcție de acesta și de debit.
- Pe baza simulării numerice a curgerii 3D cuplate rotor+colector am obținut o bună corelare a performanțelor energetice calculate cu datele experimentale.

- De asemenea, am determinat mecanismul care generează incidența variabilă pe paletele rotorului la o rotație completă. Acest fenomen fiind cauza distrugerilor cavitaționale observate in SITU la SP Jidoaia.

Pentru continuarea cercetărilor se propun următoarele direcții de cercetare:

- găsirea de soluții pentru minimizarea neuniformității câmpului hidrodinamic generat de cotul de la aspirație.
- investigații experimentale pentru vizualizarea formării cavitației pe paletele rotorului de pompă centrifugă cu ajutorul unei camere de filmat ultra-rapidă. Aceste rezultate experimentale pot valida rezultatele numerice din Cap. 5 pentru distribuția presiunii statice minime pe bordurile de atac ale paletelor.
- analiza numerică a curgerii 3D (nestaționară / bifazică) în traseul hidraulic (cot aspirație – rotor – colector).

Doctorand: ing. Ionel Aurel DRĂGHICI

Conducător științific: Prof.dr.ing. Liviu Eugen ANTON