

Flow-Feedback pentru reducerea fluctuațiilor de presiune în difuzorul conic al turbinelor hidraulice

-Rezumat-

Turbinele hidraulice moderne sunt rezultatul dezvoltării și perfecționării tehnologice pe durata a aproape două secole. În 1849 James B. Francis brevetează turbina hidraulică ce îi poartă în prezent numele, turbină cu reacțiune, radial-axială, capabilă să convertească energia hidraulică în energie stereomecanică cu randament maxim de peste 90%, ajungând la randamente maxime de depășesc chiar 95% pentru turbinele moderne de puteri foarte mari (700 MW). Această turbină este utilizată în prezent pe scară largă în centralele hidroelectrice valorificând simplitatea constructivă, robustețea și siguranța în funcționare specifice rotorului cu palete ne-reglabile. Soluțiile constructive utilizate în prezent corespund hidroagregatelor cu ax vertical, ceea ce implică utilizarea tubului de aspirație cotit pentru conducerea apei de la ieșire din rotor spre lacul aval, cu conversia unei părți cât mai ridicate din excesul de energie cinetică în presiune. Dezvoltarea hidrodinamicii teoretice și a metodelor de soluționare numerică a curgerii lichidelor reale (curgeri vâscoase turbulente) a condus în ultima jumătate de secol la proiectarea unor turbine hidraulice din ce în ce mai performante, urmărindu-se atingerea unor valori cât mai ridicate ale randamentului maxim. Turbine cu randamente maxime de peste 95% sunt la ora actuală regula pentru unități cu putere mare, de ordinul sutelor de MW. În prezent se află în studiu turbine Francis cu puterea unitară de 1 GW pentru centrale hidroelectrice ce vor fi realizate în China. Turbine cu puterea unitară de 700 MW sunt utilizate în cele mai mari centrale hidroelectrice în funcțiune (Itaipu, la granița Brazilia-Paraguay) sau în fază de finalizare (Three Gorges, China).

Prezenta teză de doctorat propune o metodă nouă de eliminare a instabilității curgerilor decelerate cu rotație în difuzorul conic al turbinelor hidraulice. Conform acestei metode, sursa instabilității poate fi practic eliminată prin injectia unui jet de apă de-a lungul axei de simetrie a conului (prin butucul rotorului). Principalul neajuns al metodei, rezultat în urma investigațiilor anterioare ale Dr.ing. A. Bosioc, îl constituie debitul relativ ridicat al jetului comparativ cu debitul de apă turbinat. Acest dezavantaj al metodei introduce pierderi volumice importante, sau necesita un consum energetic suplimentar, ceea ce a justificat reticenta constructorilor de turbine pentru implementarea acestei noi metode. Pornind de la aceste premise, teza de doctorat își propune realizarea practică, investigarea experimentală și analiza numerică a unei metode de alimentare a jetului de control al curgerii, care elimină inconvenientele de mai sus, adică nu introduce pierderi volumice și nu necesită consum suplimentar de energie.

Teza este structurată pe 8 capitole, împreună cu o bogată bibliografie ce include 145 de titluri dintre care 102 (două treimi) sunt din ultimul deceniu. În cele ce urmează este prezentată analiza conținutului capitolelor tezei, împreună cu aprecieri asupra rezultatelor principale, respectiv asupra contribuțiilor personale ale doctorandului.

Capitolul 1, introductiv, este dedicat prezentării sintetice a evoluției turbinelor hidraulice, cu accent pe turbinele de tip Francis. Atenția se îndreaptă de la bun început asupra funcționării turbinelor la regimuri variabile, pe o plajă largă în jurul punctului optim de funcționare. În particular, sunt sintetizate din literatura de specialitate problemele asociate regimurilor de funcționare cu debit parțial, unde în aval de rotorul turbinei se dezvoltă instabilități severe ale curgerii. Astfel, dintr-o mișcare axial-simetrică quasi-staționară în difuzorul conic al tubului de aspirație, curgere devine puternic nestaționară, cu dezvoltarea unui vârtej elicoidal cu mișcare de precesie și corespunzător pulsații de presiune. La aceste aspecte dinamice se adaugă și binecunoscutele aspecte energetice reflectate în creșterea rapidă a pierderilor din tubul de aspirație odată cu îndepărtarea de regimul optim, ajungând ca acestea să domine clar în bilanțul pierderilor energetice ale turbinei. Efectele pulsațiilor de presiune sunt clar documentate prin cazuri reale de smulgeri de ogivă și/sau ruperi de palete, rezultat al puternicelor vibrații și solicitări mecanice la oboseală induse de pulsațiile de presiune. Rezultă clar din §1.1 că problema abordată este nu numai acută dar și ne-soluționată corespunzător până în prezent. În continuarea capitolul introductiv este prezentată pe scurt metoda de diminuare/reducere a instabilităților mai sus menționate prin injecția unui jet de apă de-a lungul axei de simetrie a difuzorului conic, împreună cu principalele rezultate existente deja. Se identifică clar dezavantajul metodei, și anume debitul relativ necesar în jet pentru atingerea valorii de prag la care pulsațiile de presiune sunt diminuate brusc cu aproape un ordin de mărime. Apoi, în §1.3 este prezentată ideea de la care a pornit proiectul de cercetare concretizat în teza de doctorat, respectiv prelevarea unei fracții de debit din avalul difuzorului conic pentru alimentarea jetului de control, utilizând inovativ diferența favorabilă de presiune dintre peretele conului și ieșirea duzei de generare a jetului. Această soluție nu necesită în principiu nici un aport suplimentar de energie și nu consumă din debitul disponibil amonte de turbină pentru a fi procesat în rotor în vederea conversiei energiei hidraulice în energie stereomecanică la arborele turbinei. Urmare definirii problemei și a identificării metodei originale de soluționare, se prezintă în §1.4 obiectivele tezei. Acestea sunt clar definite și includ atât proiectarea, implementarea și testarea pe standul experimental a sistemului de flow-feedback pentru alimentarea jetului de control, cât și investigații experimentale complexe ale câmpului de viteză și presiune, precum și o componentă de analiză numerică însoțită de validare cu datele experimentale.

Capitolul 2 prezintă detaliat standul experimental pentru studiul curgerilor decelerate cu rotație, stand la dezvoltarea căruia doctorandul a contribuit din fazele initiale de montaj, punere în funcțiune, testare și evaluarea performanțelor. Sunt prezentate succesiv, cu detaliile necesare, circuitul închis principal, circuitul secundar pentru alimentarea jetului în sistem flow-feedback, generatorul de curgere cu rotație, secțiunea de testare de include difuzorul conic, cu cele două variante de echipare pentru măsurarea vitezei respectiv pentru măsurarea presiunii. Echipamentele de măsură sunt prezentate detaliat, cu curbele de calibrare ale debitmetrelor, calibrarea traductorului de turație al rotorului, sistemul Laser Doppler Velocimetry, și respectiv sistemul de măsurare a presiunii nestaționare la perete. Doctorandul și-a însușit corect și complet tehnicile de investigare experimentală, și a contribuit direct la implementarea sistemului de măsurare a turației rotorului, respectiv de achiziție simultană a vitezei (două componente măsurate cu LDV) și a presiunii (doi traductori piezoelectrice montați la perete) nestaționare. Capitolul 3 aduce primele contribuții originale la implementarea practică a soluției cu flow-feedback de alimentare a jetului de control al curgerii cu rotație în difuzorul conic. Astfel, se proiectează o cameră spirală pentru preluarea unei fracțiuni de debit din vecinătatea peretelui la ieșirea din difuzorul conic. În §3.1 prezintă considerațiile teoretice pentru proiectarea camerei spirale, și dezvoltă o soluție proprie de cameră spirală dublă, compusă practic din două camere spirale identice, fiecare cu unghi de înfășurare de 180° . Această soluție permite reducerea semnificativă a gabaritului radial, condiție imperativă pentru posibila implementare la turbine reale, precum și reducerea pierderilor hidraulice. Spre deosebire de camerele spirale obișnuite utilizate la construcția pompelor centrifuge, camera spirală proiectată de doctorand are la intrare o curgere meridiană în direcție axială și nu radială. Tocmai de aceea, secțiunea meridiană prezentată în Fig. 3.3 este diferită de construcția clasică a unei camere spirale colectoare dispusă la ieșirea rotorului de pompă centrifugă. Se realizează proiectarea utilizând programul expert CATIA care îi permite proiectarea directă a obiectului tridimensional. Evaluarea performanțelor hidraulice ale camerei spirale de construcție specială este efectuată în §3.2 utilizând simularea numerică tridimensională turbulentă utilizând programul expert FLUENT. Condițiile de viteză în secțiunea de intrare, pentru componentele axiale și tangențiale ale vitezei, sunt extrase din simularea curgerii axial-simetrice cu rotație în difuzorul conic. Se pune în evidență clar, în Fig. 3.19, că viteza debitantă este practic constantă în diferite secțiuni meridiane prin camera spirală, cu concluzia că proiectarea acesteia este corectă. Domeniul de analiză din Fig. 3.6 are o secțiune de intrare, cu câmp de viteză impus, și trei secțiuni de ieșire. Pe secțiunea principală de ieșire se impune condiția de echilibru radial al presiunii, consistentă cu caracterul rotațional al curgerii. Pe cele două secțiuni de ieșire din camera spirală (spre conductele de retur) se impune aceeași valoare constantă a presiunii. Se obține și caracteristica hidraulică a

camerei spirale, determinând variația debitului prelevat (care alimentează jetul de control) funcție de contrapresiunea la ieșirea camerei spirale. Sunt calculate și pierderile hidraulice în camera spirala, și se arată că respectă variația parabolică funcție de debitul prelevat. În concluzie, analiza numerică a hidrodinamicii camerei spirale confirmă corectitudinea proiectului și prin urmare s-a trecut la execuția practică, așa cum este prezentat în §3.3. Modelul fizic este realizat prin rapid prototyping, pornind de la desenul 3D realizat și instalat în aval de secțiunea de testare, Fig. 3.23. Urmează în secțiunea §3.4 testarea soluției de alimentare a jetului cu sistemul flow-feedback, și evaluarea capacității acestui sistem de a atenua pulsațiile de presiune generate de vârtejul elicoidal cu mișcare de precesie. Din analiza măsurătorilor de presiune nestaționară la peretele difuzorului conic, în patru secțiuni transversale dispuse succesiv de la secțiunea minimă spre aval, se constată reducerea sub așteptări a amplitudinii pulsațiilor de presiune, conform Fig. 3.27. Se obține totuși o reducere importantă, de 30% a amplitudinii pulsației. Pentru a explica acest rezultat experimental, doctorandul procedează la estimarea debitului în jet. Astfel, compară rezultatele obținute cu metoda flow-feedback cu rezultatele obținute prin injecția de jet cu pompă auxiliară, și concluzionează că sistemul de flow-feedback asigură un debit în jet aproximativ de 10% din debitul curgerii principale, sub pragul identificat de A. Bosioc la care are loc o scădere bruscă și substanțială a amplitudinii pulsațiilor de presiune. Aceste investigații însă demonstrează că metoda de flow-feedback are totuși capacitatea de a furniza o bună parte din debitul necesar pentru jetul de control, și realizează o scădere semnificativă a frecvenței pulsațiilor, adică încetinește mișcarea de precesie a vârtejului elicoidal.

Această primă etapă a investigațiilor experimentale a condus la concluzia că pierderile pe traseul hidraulic ce include camera spirală, conducte de retur, și conductele/canelele de alimentare a jetului au pierderi hidraulice prea mari pentru a putea fi compensate de diferența de presiune între intrarea în camera spirală și ieșirea din duza jetului. Prin urmare, în Capitolul 4 se propune o soluție tehnică simplă de suplimentare a debitului în jet. Mai întâi, comparând profilele de viteză meridională, determinate de Laser Doppler Velocimetry, în varianta cu jet alimentat cu debit recirculat, respectiv în varianta cu jet alimentat cu pompă auxiliară (unde debitul a fost măsurat precis cu debitmetru cu turbină), se confirmă concluzia anterioară că debitul în jet este de 10% din debitul total, în timp ce reducerea substanțială a pulsației de presiune ar necesita 12% debit în jet. Pentru a proiecta o soluție de creștere a debitului în jet se estimează mai întâi variația pierderilor hidraulice pe traseul de alimentare a jetului funcție de debitul în jet. Conform Fig. 4.5 este identificată înălțimea de pompare (creșterea de presiune totală) necesară creșterii debitului în jet, și se propune la finele §4.2 utilizarea unei perechi de pompe ejector montate pe conductele de retur ale camerei spirale. Soluția este simplă din punct de vedere constructiv, așa cum se prezintă în §4.3, și permite o instalare ușoară în

gabaritul conductelor de retur. La fel ca și în cazul camerei spirale, se proiectează o pompă ejector pentru diametrul conductei de retur, cu caracteristicile funcționale identificate din analiza debitului jetului și a pierderilor hidraulice pe traseul de alimentare al acestuia. Soluția propusă în Fig. 4.8 este investigată numeric, constatându-se că pompa ejector poate realiza creșterea necesară de presiune totală, cu creșterea corespunzătoare a debitului. Deși pompa ejector necesită un aport suplimentar de energie pentru alimentarea jetului motor, acesta este mic în comparație cu consumul energetic asociat jetului de control al curgerii cu rotație. În practică este chiar acceptabilă alimentarea jetului motor cu apă sub presiune prelevată din conducta forțată a turbinei, pentru ca pierderile volumice asociate sunt mici și comparabile cu pierderile volumetrice ale turbinei prin etanșările cu labirinți ale rotorului. Evaluarea performanțelor sistemului de flow feed-back cu aport suplimentar de energie este prezentată în §4.4, unde se poate observa clar că scopul propus – creșterea debitului jetului de control peste valoarea de prag necesară eliminării instabilității curgerii cu rotație – a fost atins. Este clar din Fig. 4.19 că debitul jetului are valoarea dorită, și prin urmare pulsațiile de presiune sunt aproape eliminate în toate secțiunile de măsură din difuzorul conic. Pulsațiile reziduale de presiune nu mai sunt de tip asincron (cauzate de precesia vârtejului elicoidal) ci sunt de tip sincron (piston), conform analizei din §4.5, datorate cel mai probabil oscilațiilor coloanei de lichid în circuitul hidraulic principal. Aceste concluzii sunt corect sintetizate în §4.6, oferind o imagine clară și completă asupra performanțelor sistemului de control al curgerii cu rotație proiectat.

Investigațiile experimentale asupra capacității sistemului cu flow-feedback de control al curgerilor cu rotație au fost inițial focalizate pe evaluarea diminuării amplitudinii pulsațiilor de presiune, în capitolele 3 și 4. Totuși, măsurătorile de presiune sunt efectuate doar la perete, și oferă doar informații indirecte asupra curgerii cu rotație în difuzorul conic. Prin urmare, Capitolul 5 se concentrează asupra măsurătorilor neinvazive, cu Laser Doppler Velocimetry, a câmpului de viteză. Sunt prezentate cele trei axe de măsură corespunzătoare ferestrelor optice cu care este echipată secțiunea de măsură, §5.1, și detaliile campaniei de măsurători în §5.2. Sunt prezentate profilele de viteză mediate în timp, împreună cu media pătratului fluctuației de viteză, dar și spectrul Fourier al semnalului nestăționar de viteză pe axele de măsură din difuzorul conic. Este clar evidențiată diminuarea, până spre eliminare, a fluctuației câmpului de viteză, atât pentru componenta vitezei în plan meridian, cât și pentru componenta vitezei circumferențiale, odată cu utilizarea sistemului flow-feedback, respectiv a aportului suplimentar de energie cu pompa ejector. Concomitent cu măsurarea vitezei nestăționare este măsurată și presiunea nestăționară cu doi traductori piezoelectricsi, confirmându-se rezultatele prezentate anterior pentru măsurătorile de presiune cu traductorii capacitivi de presiune nestăționară. Rezultă clar că reducerea pulsațiilor de

viteză în interiorul curgerii este direct corelată cu reducerea pulsațiilor de presiune la perete. Un rezultat care necesită probabil investigații suplimentare este prezentat în Fig. 5.31. Doctorandul arată aici că jetul alimentat de sistemul cu flow-feedback simplu reduce frecvența pulsațiilor de presiune, concomitent cu o moderată atenuare a amplitudinii, pentru ca apoi aportul suplimentar de energie cu pompa ejector să scadă practic la o treime amplitudinea mutând în același timp frecvența dominantă la valori mai ridicate. Este clar că natura nestaționarității curgerii este complet diferită în ultimul caz, pentru că locul unor pulsațiilor asincrone cu frecvență joasă este luat de pulsații sincrone cu frecvență practic dublă. O posibilă explicație pentru aceste fluctuații o reprezintă instabilitatea zonei de forfecare formată la frontiera dintre jetul de control și curentul principal. Concluzia generală a investigațiilor complexe asupra câmpului de viteză și presiune nestaționar este că sistemul de flow-feedback, cu un minim aport suplimentar de energie, și-a dovedit din plin eficacitatea prin reducerea drastică a fluctuațiilor câmpului hidrodinamic urmare a eliminării cauzei principale a instabilității care o reprezintă vârtejul elicoidal cu mișcare de precesie.

Investigațiile experimentale ample sunt completate în Capitolul 6 de investigații numerice ale curgerii cu rotație în difuzorul conic. În §6.1 sunt trecute în revistă simulările numerice anterioare realizate pe geometria secțiunii de testare a standului experimental. Menționăm că această geometrie, împreună cu condițiile de curgere aferente experimentelor fizice, constituie în prezent o problemă test pentru grupul internațional de lucru ce dezvoltă algoritmi numerici și programe de calcul al curgerilor în platforma software OpenFOAM. Această problemă test este definită pentru injecție de jet cu pompa auxiliară și nu include sistemul de alimentare a jetului prin recircularea unei fracții de debit din avalul difuzorului conic, studiat în prezenta teză de doctorat. Prin urmare, §6.2 este dedicată descrierii domeniului de calcul pentru generatorul de curgere cu rotație și a secțiunii de test, cu includerea cf. Fig. 6.11 a traseului de retur ce conectează zona de prelevare a lichidului de la perete în aval de difuzorul conic cu duza de injecție a jetului în amonte de difuzorul conic. Pentru analiza curgerii în secțiunea de test se utilizează un model simplificat de curgere turbulentă, axial simetrică, cu rotație, ale cărui ecuații sunt sumarizate în §6.3. Rezultatele numerice prezentate în §6.4 confirmă faptul că modelul simplificat axial-simetric surprinde corect regimul de funcționare cu flow-feedback, Fig. 6.20. Totuși, o limitare importantă a modelului este modalitatea de specificare a pierderilor hidraulice pe traseul de retur care asigură alimentarea jetului. Este clar că traseul hidraulic relativ complex de pe standul experimental (camera spirală, conducte de retur, coturi și canale) este modelat într-o variantă foarte simplificată în varianta axial-simetrică a cărei secțiune în semiplan meridian este prezentată în Fig. 6.20. Prin urmare, pierderile hidraulice reale trebuie introduse via condiții pe frontieră, pentru a obține în simularea numerică debite în jet

similare cu valorile măsurate, fără și cu aport suplimentar de energie. Cu toate acestea, se reușește să se evidențieze prin simulare numerică modul de funcționare și principalele caracteristici hidrodinamice, Fig. 6.21, ale sistemului de control al curgerii cu rotație care s-a investigat experimental.

În Capitolul 7 este aprofundată analiza rezultatelor numerice prin compararea lor cu măsurătorile experimentale de viteză pe cele trei axe de măsură. Pentru câmpul de viteză de la ieșirea din generatorul de curgere cu rotație, Fig. 7.1, se constată o foarte bună concordanță a profilelor de viteză meridiană și circumferențială cu măsurătorile LDV. De remarcat faptul că profilele calculate sunt rezultatul simulării curgerii curgerii tridimensionale în generatorul de curgere cu rotație cu simularea curgerii bidimensionale axial-simetrice în secțiunea de testare. Pentru cele două axe de măsură din difuzorul conic sunt prezentate rezultatele la cele trei regimuri de funcționare investigate: fără flow-feedback, Fig. 7.2, cu flow-feedback, Fig. 7.3, și respectiv cu flow-feedback și aport suplimentar de energie, Fig. 7.4. Se constată în toate cazurile o concordanță surprinzător de bună a rezultatelor numerice cu datele experimentale, ținând cont de simplificările inerente modelului de curgere axial-simetrică. Este examinată și repartitia presiunii la perete în §7.2, evidențiindu-se clar în Fig. 7.5 îmbunătățirea semnificativă a recuperării de presiune în difuzorul conic odată cu utilizarea sistemului flow-feedback de control al curgerii.

Concluziile generale și contribuțiile originale sunt rezumate în Capitolul 8. În sinteză, se identifică neajunsul principal al controlului curgerii cu rotație în difuzoare conice prin injecție de jet de apă de-a lungul axei de simetrie, și își propune să realizeze un sistem de alimentare a jetului care să nu introducă pierderi volumice inacceptabile pentru turbina hidraulică în ansamblu. Se constată că jetul poate fi alimentat prin recircularea unei fracțiuni din debitul turbinat prelevată din aval de difuzorul conic, fără să influențeze curgerea și transferul energetic din rotorul turbinei. Soluția tehnică propusă, parcurge etapele firești de proiectare, verificare prin simulare numerică, realizare practică, testare și evaluarea performanțelor, demersul fiind completat din punct de vedere științific de investigații experimentale detaliate ale câmpului de presiune și viteză, respectiv de investigații numerice care oferă o imagine clară și completă a modului în care este eliminată cauza principală a instabilității curgerii.