



A XVIII-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”
CLUJ NAPOCA, 2018

REPARTIȚIA OPTIMĂ A PUTERII ÎNTRE HIDROAGREGATELE UNEI CENTRALE HIDROELECTRICE

Cristian PURECE, Valeriu PANAITESCU, Adrian ADAM

OPTIMAL POWER REPARTITION BETWEEN UNITS OF A HYDRO POWER PLANT

The paper presents a methodology for the operation of those hydro power plants provided with more penstocks and more units by the optimal distribution of the dispatched power among its available generating units, aiming at the maximum efficiency of the completely hydro power plant energy conversion. Considering the unit operating characteristics as unequal at different head levels, the authors propose a modern program of optimal distribution of power between the units of a hydro power plant to take into account the real characteristics and real head for each unit to define the actual performance specifications. Further, this information can be utilized in the optimization process to minimize water expenditure at hydropower plant.

Keywords: hydro power plant, hydro unit, efficiency, hydraulic turbine, optimal load distribution

Cuvinte cheie: centrală hidroelectrică, hidroagregat, randament, turbina hidraulică, distribuția optimă a încărcării

1. Introducere

Dezvoltarea bazei energetice în condițiile unei perfecționări continue a optimizării exploataării centralelor hidroelectrice pentru

satisfacerea cererii de energie electrică curată este o problemă ce preocupă în mod constant specialiștii în domeniul hidroenergetic din toată lumea. Dezvoltarea producției de energie electrică și a producției de hidroenergie în special este indisolubil legată de continua perfecționare a proiectării, construcției și exploatării centralelor și sistemelor hidroenergetice.

Centralelor hidroenergetice le revine în general rolul de acoperire a vârfurilor de consum energetic, respectiv de a efectua servicii de sistem.

Acumulările importante pot efectua compensări sezoniere sau anuale, cumulând stocuri disponibile de apă în perioadele de consum energetic redus respectiv de afluență excedentară pentru a le valorifica în perioadele de consum energetic maxim, conform intereselor/cerințelor sistemului energetic.

Aducând în centrul cercetării problema exploatării optimizate a centralelor hidroenergetice, prezenta lucrare își propune să contribuie la perfecționarea metodelor de conducere optimă a exploatării centralelor hidroelectrice în scopul valorificării cât mai depline a potențialului hidroenergetic disponibil.

Obținerea unui maxim de energie electrică la un același consum de volum de apă este una din modalitățile de mărire a eficienței producției de energie electrică [1], [2].

Prezenta lucrare își propune găsirea unei metodologii/tehnologii adecvate prin care să se realizeze dezideratul de mai sus. Acest lucru se concretizează în generarea unor programe de calcul general valabile pe tipuri de centrale (de înaltă sau joasă cădere) și putând fi particularizate în funcție de specificul fiecărei amenajări hidroenergetice, în funcție de numărul și tipul hidroagregatelor din fiecare centrală hidroelectrică. Aceste programe utilizează ca date de intrare parametrii și caracteristicile reale de funcționare ale hidroagregatelor din centralele hidroelectrice.

2. Modul de punere al problemei

În vederea obținerii unui maxim de producție de energie electrică este necesar ca o centrală hidroelectrică cu mai multe hidroagregate să funcționeze la parametrii optimi. Aceasta înseamnă o funcționare a hidroagregatelor în zonele de randament maxim, zone care de obicei nu se realizează la puterea maximă a hidroagregatului (figura 1), iar centrala să funcționeze cu pierderi de sarcină minime (cu debit minim) în condițiile unei puteri impuse pe centrală [3].

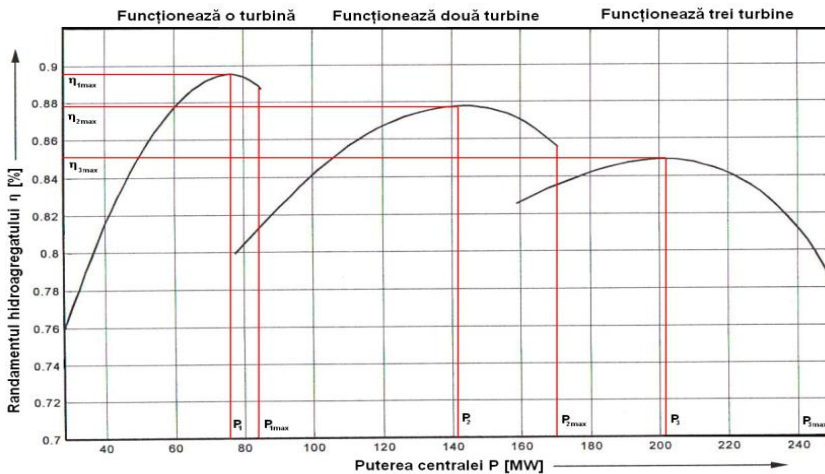


Fig.1 Variația randamentului hidroagregatelor în funcție de puterea centralei

Acest mod de funcționare a centralelor și a amenajărilor hidroenergetice va crea un stoc de apă disponibil care va conduce în timp la mărirea căderii și realizarea unei rezerve de apă și la obținerea unei producții suplimentare de energie electrică prin turbinarea stocului de apă creat.

Rezolvarea problemei funcționării optime a hidroagregatelor din centralele hidroelectrice se face pornind de la:

- cunoașterea caracteristicilor reale de exploatare a hidroagregatelor și a limitelor tehnice de lucru ale fiecărui hidroagregat;
- cunoașterea curbelor de variație a randamentului în raport cu căderea;
- cunoașterea variației pierderilor de sarcină în raport cu căderea și debitul turbinat;
- cunoașterea gradului de interinfluență a hidroagregatelor între ele și în diverse variante de funcționare simultană.

Determinarea elementelor enunțate anterior se face în cadrul probelor de performanță prin experimentări in situ.

Plecând de la premiza că un hidroagregat este proiectat în general pentru o durată de funcționare de cel puțin 40 de ani, cu o durată medie anuală de cel puțin 2000 de ore și un număr de porniri - opriri de 730/an și ținând cont că majoritatea hidroagregatelor din centralele hidroelectrice din România au fost puse în funcțiune în anii

60'- 70' se impune necesitatea unei evaluări periodice a stării de funcționare a hidroagregatelor în urma efectuării unor probe de performanță prin măsurarea in situ a parametrilor reali de funcționare ai hidroagregatelor.

Probele de performanță se realizează în conformitate cu prevederile codului CEI 41/1991 [3] (în prezent transformat în SR EN 60041 [4]), precum și ale codurilor ASME PCT-18/2002 [5]; CEI 62006/2010 [6] și se efectuează cu o periodicitate reglementată de prescripția energetică PE 301/93 [7].

De asemenea rezolvarea problemei funcționării optime comportă două aspecte:

- stabilirea modelului matematic și a strategiei de optimizare (repartiția optimă a puterii între hidroagregatele unei centrale hidroelectrice);

- determinarea prin experimentări *in situ* a caracteristicilor reale de funcționare a hidroagregatelor din centralele și amenajările hidroenergetice.

Abordarea problemei funcționării optime se va face separat pe două tipuri de centrale hidroelectrice:

- centrale de înaltă cădere, unde influența majoră asupra strategiei de optimizare este dată de partea amonte de turbina hidraulică (lac, aducțiune, conductă forțată, distribuitor);

- centrale de joasă cădere, unde influența majoră este dată de bieful aval.

În prezenta lucrare este tratat numai cazul centralelor de înaltă cădere.

3.Stabilirea ecuațiilor modelului de optimizare

3.1 Bazele fizice ale modelului de optimizare

În cazul unei centrale hidroelectrice de mare cădere cu lac de acumulare se cere optimizarea momentană prin producerea unei puteri cerute de dispecerul energetic cu pierderi minime, respectiv cu un consum minim de apă [8].

Apa din lacul de acumulare est adusă la turbine printr-un sistem de galerii, iar turbinele pun în funcțiune câte un generator.

Puterea teoretică obținută în cazul unei centrale hidroelectrice este

$$P_o = g\rho HQ , \quad (1)$$

unde g este accelerația gravitațională, ρ – densitatea apei, H –căderea brută, Q – debitul turbinat.

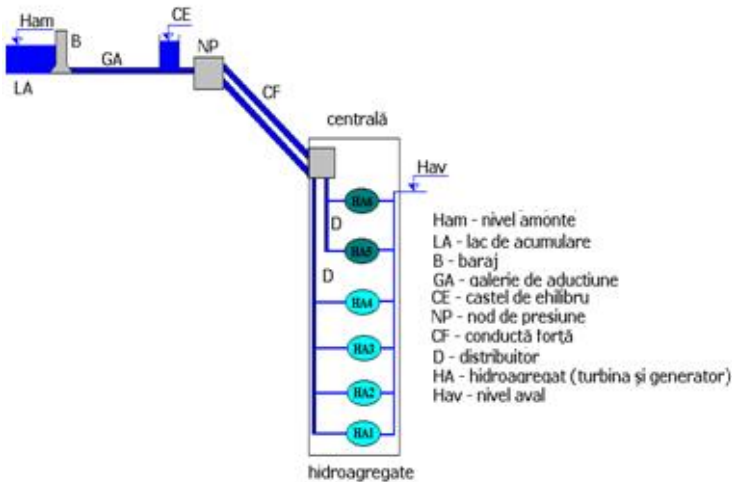


Fig. 2 Schema de principiu a unei amenajări hidroenergetice de mare cădere

Puterea teoretică nu este complet transformată în putere electrică și apar pierderi hidraulice în conducta de aducțiune, în conducta forțată, în distribuitor, pierderi în turbină și pierderi electrice în generator.

Pierderile hidraulice se pot exprima ca reducere a căderii nete a turbinei. Căderea netă poate fi determinată prin:

- calcul, determinând aceste pierderi pe fiecare tronson al amenajării amonte de turbina hidraulică și prin adunarea lor,
- prin măsurători in situ, se va determina valoarea globală a acestor pierderi.

Aceste pierderi (h_r) se pot exprima prin relația

$$h_r = KQ^2, \quad (2)$$

unde K este un coeficient de pierderi.

Căderea netă a turbinei (H_n) este

$$H_{ni} = H_{ni}(H, Q_1, \dots, Q_n). \quad (3)$$

Puterea turbinei (P_{Ti}) este

$$P_{Ti} = g\rho H_{ni} Q_i \eta_{Ti}. \quad (4)$$

Pierderile în turbină sunt exprimate global prin randamentul turbinei (η_{Ti})

$$\eta_{Ti} = \eta_{Ti}(H_{ni}, Q_i) = \eta_{Ti}(H_{ni}(H, Q_1, \dots, Q_n), Q_i). \quad (5)$$

Randamentul turbinei este cel din datele de proiect (indicat de furnizorul de echipament) sau determinat prin măsurători in situ.

Pierderile în generator vor fi indicate, în mod analog, de către fabricantul generatorului (direct sau prin randamentul generatorului) sau determinate prin măsurători in situ.

Acest randament (η_{Gi}) este exprimat uzual la $\cos \varphi = \text{ct}$, funcție de puterea dată (P_{Gi}),

$$\eta_{Gi} = \eta_{Gi}(P_{Gi}). \quad (6)$$

Puterea generatorului este

$$P_{Gi} = g \rho H_{ni} Q_i \eta_{Ti} \eta_{Gi}. \quad (7)$$

3.2 Modelul matematic

Pornind de la modelul fizic descris în paragraful 3.1 se obține următorul model matematic de optimizare:

Puterea necesară P să fie produsă cu un minim de energie potențială pe unitatea de timp, cu alte cuvinte puterea teoretică P_o să fie minimă,

$$P_o = g\rho H(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n) = \min! \quad (8)$$

Puterea totală rezultă prin însumarea puterilor de la toate generatoarele centralei hidroelectrice,

$$P = \sum_{i=1}^n P_{Gi}(H, Q_1, \dots, Q_n). \quad (9)$$

De asemenea se pun condițiile

$$P_i = 0 \text{ sau } P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}, \quad (10)$$

respectiv

$$0 \leq Q_i \leq Q_{i \max}. \quad (11)$$

În concluzie o funcție obiectiv (8) se minimizează în condițiile (9), (10), (11).

Căderea H intervine ca o constantă în optimizarea momentană (nivelul în lac are a variație mică în raport cu căderea); de asemenea mărimile g și ρ sunt constante. În aceste condiții modelul matematic se poate simplifica la

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \min! \quad (12)$$

în condițiile

$$P = \sum_{i=1}^n P_i (H, Q_1, \dots, Q_n) , \quad (13)$$

respectiv

$$P_i = 0 \text{ sau } P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max} \quad (14)$$

$$0 \leq Q_i \leq Q_{i \max} . \quad (15)$$

Se obține astfel un model de optimizare cu o funcție obiectiv liniară și $4n + 1$ condiții secundare parțial neliniare.

4. Prezentarea programului de repartiție optimă

Pe baza modelului matematic prezentat, pentru o mai bună exploatare a centralelor hidroelectrice de mare cădere s-a elaborat un program de calcul care să indice încărcarea optimă a fiecărui hidroagregat în funcție de puterea cerută de către dispecerul energetic național (DEN).

Pentru testarea programului de calcul realizat s-a ales centrala hidroelectrică (CHE) Stejaru [9], centrală hidroelectrică de mare cădere cu două distribuitoare, unul deservind 4 hidroagregate de 27,5 MW și altul deservind 2 hidroagregate de 50 MW.

Programul de calcul este realizat în Visual C++ sub Windows și are ca date de intrare parametri reali de funcționare ai fiecărui hidroagregat. Poate rula ca program separat sau se poate fi apelat prin intermediul unei aplicației. Necesitatea realizării acestui program a apărut datorită volumului mare de calcule matematice care crește odată cu numărul hidroagregatelor. Programul de calcul este specific acestui tip de hidrocentrală, însă poate fi ușor adaptat și pentru altele.

În vederea obținerii unui maxim de producție de energie electrică este necesar ca o centrală hidroelectrică cu mai multe

hidroagregate să funcționeze în zonele de randament maxim ale hidroagregatelor, iar centrala să turbineze un debit minim în condițiile unei puteri solicitate.

Modelul matematic este bazat pe criteriul debitului minim.

În decursul timpului s-au efectuat măsurători energetice astfel încât valorile mărimilor hidraulice să poată fi determinate pentru o gamă de căderi acoperitoare ale centralei. Pornind de la parametri reali de funcționare determinați prin încercări s-au trasat corelațiile de funcționare și s-au făcut interpolări pentru obținerea valorilor tuturor parametrilor corespunzători unui interval de putere de 1 MW.

S-au creat fișiere de date de intrare pentru diverse căderi de calcul care conțin valori ale puterii, randamentului, debitului și deschiderii ale aparatului director pentru fiecare hidroagregat, în gama de căderi 120 ÷ 140 MW.

S-au stabilit zonele de puteri pe centrală, pentru care se funcționează cu cele patru hidroagregate mici într-un domeniu cuprins între 14 ÷ 28 MW și cu cele două hidroagregate mari în domeniul de puteri cuprins între 28 ÷ 56 MW. Repartiția optimă a puterii solicitate se realizează ținând cont de numărul de hidroagregate în funcțiune la un moment dat.

Inițial programul testează încadrarea într-una din zonele de mai sus, după care apelează o funcție specifică fiecărui tip de interval. Aceste funcții compară în cicluri imbricate, pentru fiecare combinație posibilă de încărcări, valoarea sumei debitelor. Odată găsite valorile puterilor pentru fiecare hidroagregat (care însumate dau puterea solicitată), din toate combinațiile posibile se alege cea pentru care

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \min! \quad (16)$$

unde n este numărul de hidroagregate.

La lansarea programului în execuție apare o "cutie de dialog" din care se selectează cu butonul din stânga al mouse-ului puterea solicitată pe centrală, hidroagregatele disponibile și căderea de calcul.

La apăsarea butonului de "OK" se deschide o altă cutie de dialog în care se afișează valorile corespunzătoare repartiției optime pentru fiecare hidroagregat, căderea de calcul, puterea cerută și debitul total turbinat.

La următorul "OK" programul revine în prima cutie de dialog. Se părăsește programul apăsând butonul "Exit".

5. Concluzii

■ Caracteristicile de exploatare trasate au utilizat ca valori datele rezultate în urma probelor in situ efectuate la CHE Stejaru pentru diferite căderi nete de calcul H_{nc} în decursului timpului în anii: 1986 (HA 2 – $H_{nc} = 122$ m), 1992 (HA 1 ÷ HA 6 – $H_{nc} = 139$ m), 1994 (HA 2 ÷ HA 6 – $H_{nc} = 127$ m), 1995 (HA 1 ÷ HA 4 – $H_{nc} = 120$ m), (HA 5 ÷ HA 6 – $H_{nc} = 124$ m), 2010 (HA 2 ÷ HA 6 – $H_{nc} = 125$ m). Toate aceste date au fost prelucrate într-o formă unitară pentru a putea extrapola și trasa toate diagramele de exploatare pentru întreaga gamă de căderi.

■ Programul de repartiție optimă a puterii între grupurile unei centrale a fost elaborat pentru CHE Stejaru în gama de căderi nete $H_n = 120$ m ÷ 140 m (căderi frecvente în exploatare la un nivel amonte de 498 mdM ÷ 510 mdM în lacul Bicaz).

■ Programul elaborat utilizează ca date de intrare parametrii reali de exploatare ai turbinelor, determinați prin măsurători sau obținuți din caracteristicile de exploatare trasate.

Dificultatea extinderii acestui program constă în faptul că CHE Stejaru este cea mai complexă centrală de mare cădere din România.

■ Programul poate fi generalizat însă și la alte centrale hidroelectrice de mare cădere cu condiția existenței sau determinării prin măsurători a caracteristicilor de exploatare reale.

Se recomandă efectuarea de probe în continuare la centrala CHE Stejaru pentru completarea volumului de date reale și la alte căderi în vederea acoperirii întregii game ($H_{nc} = 100$ m, $H_{nc} = 110$ m, $H_{nc} = 130$ m, $H_{nc} = 135$ m, $H_{nc} = 142$ m).

■ Programul este realizat într-un mediu de programare foarte performant și flexibil. Fiind o aplicație Windows (conține ferestre, butoane, cutii de dialog) este ușor de folosit de către operator, nefiind nevoie de o pregătire specială, ci doar de cunoștințe de utilizator Windows.

■ Prin repartiția optimă a puterii între hidroagregatele unei centrale hidroelectrice utilizând caracteristicile de exploatare reale se obține un spor de energie productibilă (sau un consum minim de apă) de minim 2 %.

BIBLIOGRAFIE

- [1] G. Glazyrin et al., *Optimal Power Distribution among Hydropower Units Taking into Account Head Loss in Units' Trash Screens*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 698, pp. 774-779, 2015.
- [2] E.C. Bortoni, G. S. Bastos, T. M. Abreu, and B. Kawkabani, *Online optimal power distribution between units of a hydro power plant*. Renewable Energy, No.75,2015 pp. 30-36.
- [3] A. G. Diacon, E. C. Isbășoiu, M. Constantinescu, *Optimizarea funcționării centralelor hidroelectrice de medie și mare putere, având ca funcție obiectiv de optimizare obținerea maximului de energie pentru apa uzinată*. Revista Energetica, ISSN 1453-2360, Vol.49, Nr.10 din 2001, pag. 441-446.
- [4] * * * CEI 41, *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pumps-turbines*. Geneva, Switzerland, CEI 3rd edition, 1991.
- [5] * * * SR EN 60041 2003, *Încercări de recepție efectuate pe mașina reală, pentru determinarea performanțelor hidraulice ale turbinelor, pompelor de acumulare și turbinelor – pompe*. Prima ediție, București 2003.
- [6] * * * ASME PTC 18, American National Standard, *Hydraulic turbines and pump-turbine performance test codes*. New York, USA, ASME 2002 (consolidation of ASME PTC 18-1992 and ASME PTC 18.1-1978).
- [7] * * * CEI 62006, *Hydraulic machines. Acceptance tests of small hydroelectric installations*. Geneva, Switzerland, CEI 1st edition, 2010.
- [8] * * * PE 301, *Regulament de exploatare a instalațiilor de turbine hidraulice din centralele hidroelectrice*, Editura ICEMENERG, București 1994.
- [9] ICEMENERG, *Finalizarea soluției și programului de calcul pentru repartitia optimă a puterii între grupurile CHE D. Leonida*. Contr. nr. 329/08.09.1999.
- [10] C. Purece, S. Dumitrescu, I. Bălăușescu, *Capacitatea de încărcare a unei centrale hidroelectrice în funcție de nivelul în lacul aval*. A XV-a Conferință internațională multidisciplinară „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”. Sebeș – Alba, 5-6 iunie 2015. Știință și inginerie. Vol. 27/2015, ISSN 2067-7138, Editura AGIR, București, 2015, pp. 397- 406.

Dr. Ing. Cristian PURECE
INCDE ICEMENERG București
e-mail: cristianicemenerg@yahoo.com

Dr. Ing. Valeriu PANAITESCU, profesor universitar emerit
UPB București, Facultatea de Energetică
e-mail: valeriu.panaitescu@yahoo.com

Dr. Ing. Adrian ADAM
INCDE ICEMENERG București
e-mail: adam@icemenerg.ro