

Darكو Korošec, dipl.ing.
 Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, Ljubljana
 Odsek za reaktorsko tehniko

ANALIZA DELOVANJA GLAVNE ČRPALKE REAKTORSKEGA HLADILA

MAIN REACTOR COOLANT PUMP OPERATING ANALYSIS

POVZETEK: V delu je pojasnjen namen glavne črpalke primarnega reaktorskega hladila, ki predstavlja bistven del hladilnega sistema jedrske elektrarne. Pri obravnavanju nezgodnih stanj z računalniškimi programi je zelo važno poznavanje obnašanja glavne črpalke in njene karakteristike tudi v drugih področjih dela. Prikazan je primer homologne obratovalne karakteristike in njena uporaba. Podane so tudi osnove za izračun hitrosti vrtenja črpalke ob izlivni nezgodi. Dosedanji rezultati kažejo ustreznost popisa črpalke ob nezgodi z homolognimi krivuljami.

ABSTRACT: In present work, the behaviour during accident of Main Reactor Coolant Pump is described. Reactor Coolant Pump is essential part of primary coolant system of nuclear power plant. To know its integrity is very important in computer analysis and under a hypothetical loss of coolant accident conditions. The form of a homologous curve is explained. The pump transient speed behaviour and structural evaluation of the system considering time varying loads is described.

1.0 Uvod

Energijo fisije, ki se osvobaja v jedrskem reaktorju, pretvarjamo v toplotno energijo. To moramo iz sredice reaktorja odvajati. Za odvod energije skrbi hladilo, ki kroži po zaprtem sistemu. Za dovolj hitro odvajanje toplote skrbi zadostna cirkulacija hladila. Zaradi zelo velikih količin osvobojene energije so potrebne tudi velike količine hladila oziroma veliki pretoki. Glede na to, da je zahtevana tudi največja možna zanesljivost in varnost v obratovanju, se postavljajo pred glavno črpalko primarnega hladilnega tokokroga stroge tehnološko-konstrukcijske zahteve.

Pretok hladila je potrebno ustvariti v pogojih maksimalne zanesljivosti v obratovanju črpalke in to gledano ne samo s stališča zahtev eksploatacije postrojenja, temveč tudi s stališča zanesljivosti /2/. Prekinitev cirkulacije hladila je lahko vzrok eni od največjih mogočih nezgod: taljenju sredice.

Naslednja stroga zahteva je zahteva po tesnjenju gredi črpalke. Primarno hladilo je radiološko aktivno. Tlačnovodni reaktorji imajo gredi glavnih hladilnih črpalk tesnjene z labirintnimi tesnili, dodatno povečanje tesnjenja pa je doseženo z protisernim tokom tesnilne vode (seal injection), ki s protitlakom preprečuje puščanje tesnil.

2.0 Vloga črpalke primarnega hladila

Eden od možnih izvorov nezgode v nuklearnem energetskem postrojenju je prenehanje cirkulacije reaktorskega hladila. Takšna situacija lahko nastopi zaradi prekinitve dela hladilnih črpalk primarnega tokokroga. Vzrok prekinitve je lahko izpad električnega napajanja pogojskega motorja, ali pa varnostna ustavitve zaradi padca tlaka v sistemu hladila, previsokih temperatur ležajev, tesnilne vode ali drugih nenormalnih stanj v ostalih podsistemi energetskega postrojenja.

V takih primerih delo reaktorja prekinemo in začnemo hlajenje s pomožnimi sistemi.

Zelo važno je, da poznamo hitrost padanja cirkulacije oziroma pretoka po izpadu črpalke. Pretok se ne prekine trenutno in v kratkem času, ker ima cel sistem še neko gibalno energijo in s tem tudi vztrajnost. Sprememba hitrosti hladila poteka po eksponentni krivulji. Glavni vplivni faktor na spremembo hitrosti pretoka je vztrajnostni moment. Z primerno izbiro vztrajnika črpalke lahko dosežemo, da se po izpadu črpalke nadaljuje cirkulacija hladila še dovolj dolgo, da se lahko aktivirajo drugi sistemi za odvod toplote iz sistema.

Upoštevati pa je treba, da zaradi prevelike zaostale toplote lahko pride do uparjanja hladila ali pa poškodbe gorivnih elementov, kar vse zelo poveča lokalne hidravlične upore in s tem zavira pretok hladila.

3.0 Hladilni sistem in njegovo modeliranje

Hladilni sistem in njegove komponente najlažje globalno obravnavamo s simulacijo z računalniškimi programi.

Glavna predpostavka modela je, da je razvita tlačna višina, ki jo daje črpalka in ki je potrebna za kroženje hladila, podobna sili, ki deluje na volumen fluida. Z modeliranjem lahko simuliramo različna stanja hladila in črpalke. To nam omogoči opazovanje obnašanja sistema in njegovo analizo glede na stanja, ki so značilna za nezgode.

Hladilni sistem jedrske elektrarne v Krškem je pod delovnim tlakom 155 bar, temperatura hladila v hladni veji pa je 287,5°C. Sistem ima dve zanki in s tem tudi dve glavni hladilni črpalki. Črpalki stalno črpata hladilo v zadostni količini skozi sredico reaktorja in s tem zagotavljata ustrezen in kvaliteten prenos toplote.

V računalniških programih se obravnava matematični model sistema primarnega hladila. Matematični model vsebuje enačbe kontinuitete, enačbe dvofaznega toka, gibalne in energijske enačbe. Elemente pretočnega sistema, kot so cevovodi, zaporni elementi in povezave teh elementov modeliramo posebej /4/.

3.1 Konstrukcijska izvedba glavne hladilne črpalke

Črpalka je enostopenjska, centrifugalna, vertikalne izvedbe. Motor, ki žene črpalko je s togo sklopko vezan z gredjo črpalke. Ohišje črpalke je lito iz nerjavnega jekla, prav tako tudi rotor.

Hladilni medij je demineralizirana voda z dodatkom borove kisline in snovi, ki preprečujejo oksidacijo elementov pretočnega sistema.

Črpalko kot celoto lahko razdelimo na štiri funkcijske podsisteme:

- rotor črpalke nizke specifične hitrosti,
- termično zapreko nad rotorjem,
- tri tesnila, združena v paket s sistemom tesnilne vode,
- pogonski motor s hladilnim sistemom, ležaji in vztrajnikom.

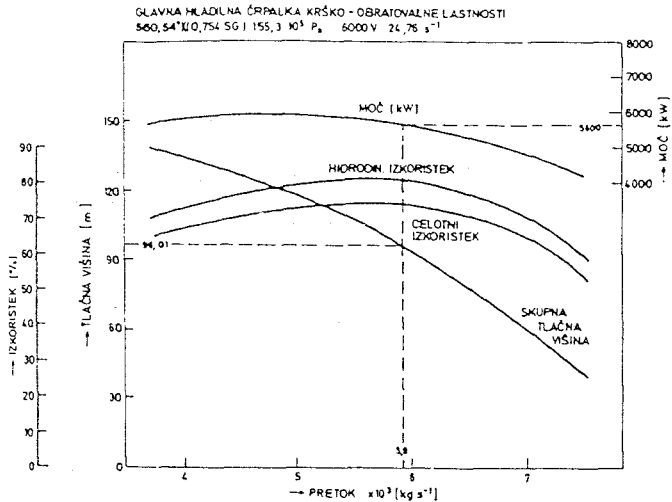
3.2 Obratovalna karakteristika

Klasična obratovalna karakteristika, ki podaja tlačno višino v odvisnosti od pretoka zadošča kot osnovni diagram črpalke le za normalno obratovalno področje, to je, ko črpalka črpa fluid in ustvarja željeno tlačno višino.

Za potrebe varnostnih analiz pa so bili narejeni homologni modelni preizkusi, ki upoštevajo tudi različne obratovalne pogoje, kot so:

- črpalni medij je pretežno v plinastem stanju
- smer vrtenja črpalke se lahko obrne
- turbinsko področje obratovanja
- disipacijski režim dela

Vsi naštetih režimi dela so prikazani v homolognem štirikvadrantnem diagramu. Vpliv deleža pare upoštevamo s tlačnim množiteljem, ki glede na delež pare zniža tlačno višino.



Slika 1: Obratovalne lastnosti glavne napajalne črpalke

3.3 Predvidena nezgodna stanja in odziv sistema

Predpostavimo lahko naslednja stanja črpalke, elektromotorja, dovodnega in odvodnega cevovoda:

- izpad električne napetosti oz. napajanja elektromotorja,
- poškodbo na sesalni strani črpalke-dovodu,
- poškodbo na tlačni strani črpalke-odvodu.

Predpostavimo lahko še, da lahko motor ob nezgodi teče, ali pa ga ustavimo z varnostnim signalom.

Spreminjanje obratovalnih parametrov ob poškodbi je zbrano v razpredelnici:

Mesto poškodbe	Delovanje motorja	Smer vrtenja + - N	Karakteristični brezdimenzijski koeficienti			Režim dela in tip homologne krivulje
			$h = \frac{H}{H_R}$	$V = \frac{Q}{Q_R}$	$\alpha = \frac{\omega}{\omega_R}$	
Sesalna stran	DA	+	< 0	< 0	< 0	disipacija HVD turbina HVT
	NE	-	< 0	< 0	< 0	turbinsko HVT
Tlačna stran	DA	+	> 0	> 0	> 0	gnana črpalka HVN
	NE	+	< 0 > 0	> 0 > 0	> 0	turbina HVN - HVT
Izklop motorja	NE	-	> 0 < 0	< 0	< 0	Iz HVN preko disipacije v HVT

Karakteristika črpalke v področju normalnega režima dela je prikazana na sliki 1.

Oznaka HVN na sliki 2 pomeni homologno krivuljo, za katero je abscisa osnovne karakteristike izražena s pretokom ($V = Q/Q_R$), N pomeni normalno področje obratovanja, D disipacijsko in T turbinsko /1/.

Glavni brezdimenzijski koeficienti so: $h = H/H_R$, $V = Q/Q_R$ in $\alpha = \omega/\omega_R$. Indeks R pomeni referenčno vrednost parametrov pri katerih črpalka obratuje v stacionarnem stanju: tlačne višine, pretoka in vrtilne hitrosti.

Pri normalnem obratovanju obratuje črpalka v točki $h/V^2 = 1$ in $\alpha/V = 1$, saj so vse vrednosti parametrov enake referenčnim. Ob nezgodi pa se začne točka obratovalnega stanja črpalke premikati po eni izmed krivulj.

je:

$$I \frac{d\omega}{dt} = \sum T \quad (1)$$

$$\sum T = T_e - T_H - T_T$$

kjer pomeni: I - skupni vztrajnostni moment vrtečih delov,
 ω - kotna hitrost,
 t - čas,
 T_e - električno inducirani moment na rotorju,
 T_H - hidravlični moment na rotor črpalke,
 T_T - moment zaradi sil trenja in ventilacije.

Električni moment je funkcija vrtljajev elektromotorja. Majhne spremembe vrtilne hitrosti (sprememba velikosti hitrosti je vsiljena pri izlivni nezgodi) povzročijo znaten porast momenta. Motor s svojo električno karakteristiko preprečuje prevelike prekoračitve hitrosti, saj se prične obnašati kot generator.

Hidravlični moment je odvisen od hitrosti vrtenja črpalke, pretoka skozi črpalke in gostote fluida oziroma njegovega termodinamičnega stanja. Za različne režime dela črpalke lahko določimo na podlagi modelnih preizkusov velikost in smer momenta.

Moment trenja in ventilacijski moment ne vplivata bistveno na hitrost črpalke ob nezgodi. Moment trenja je računani ponavadi po empirični enačbi, v kateri je glavna vplivna veličina hitrost.

Prevelika hitrost črpalke, ki jo ta doseže ob nezgodi, je nezaželena iz več razlogov: vrteči deli so dinamično preobremenjeni, sile na ležaje se povečajo preko dopustnih meja, tok fluida dobi ob nezgodi velik delež pare, ki je neenakomerno porazdeljen. S tem so sile na gonilnik neenakomerno porazdeljene in nastopijo lahko deformacije gredi /3/.

V primeru, da pride do izgube napajanja pogonskega elektromotorja črpalke želimo, da se ohrani vrtenje črpalke čim dlje. S tem namreč ohranimo pretok primarnega hladila skozi sredico reaktorja in zmanjšamo nevarnost poškodb sredice zaradi neodvedene toplote. Sistem črpalke ima na gredi elektromotorja nameščen vztrajnik, ki tudi po izpadu napetosti omogoča dovolj dolgo vrtenje črpalke.

Izklop elektromotorja in prehod na naravno cirkulacijo je bil izračunan za primer NE Krško. Pojemanje hitrosti in pretoka je vidno kot približno eksponentno padanje vrednosti. Izračun je bil narejen v sklopu programa RELAP5, ki uporablja za izračun hitrosti črpalke enačbo (1). Primerjava z

dejanskim časom ustavljanja črpalke in pojemanjem hitrosti pokaže, da preračun v programu RELAP 5 ustreza dejanskim razmeram /3/.

V diagramu homolognih karakteristik poteka izklop motorja in prehod na naravno cirkulacijo po krivulji HVN od vrednosti $h/\sqrt{v}=1$ in $\alpha/v=1$ navzdol preko abscise do vrednosti $h/\sqrt{v}=0.98$ in $\alpha/v=0$. Črpalka je v tej točki ustavljena, hladilo teče z zelo majhnim pretokom samo pod vplivom termičnega neravnovesja. Zaradi zelo majhnih pretokov je tu težko določiti dejansko vrednost krivulje HVN za naravno cirkulacijo. Tu se pokaže, da napaka metode (računalniškega programa) in vhodnih podatkov najbolj vplivata na rezultate prav pri mejnih stanjih, kot je to primer naravne cirkulacije. Prekinjena krivulja HVN kaže, kakšna bi bila homologna karakteristika za večje pretoke in tlačne višine iste črpalke. Dobljena je s pomočjo osnovnega diagrama $H=H(Q)$ in pretvorbe vrednosti desno od optimuma v brezdimenzijske homologne koeficiente. Rezultati kažejo smiselno nadaljevanje krivulje in ujemanje homologne krivulje z obratovalno karakteristiko.

4.0 Zaključek

Podane so osnove za ustrezno modeliranje glavne črpalke in pravilno upoštevanje obnašanja v primeru nezgode. Ob nezgodi oziroma izlivu reaktorskega hladila prehaja črpalka skozi disipacijsko področje in področje turbinskega obratovanja. Intenzivnost obnašanja v posameznem kvadrantu je odvisno od velikosti poškodbe, mesta poškodbe in vpliva ostalih faktorjev, kot so npr. delovanje motorja in vztrajnostni momenti vrtečih delov.

Z nadaljnim delom bo potrebno natančneje določiti potek naravne cirkulacije v homolognem diagramu. Prehajanje obratovalne točke črpalke preko disipacijskega in turbinskega področja pa je bilo na obstoječih matematičnih modelih za nezgodna stanja preverjeno z računalniškim programom RELAP5 na primeru glavne hladilne črpalke NE Krško. To kaže na ustreznost uporabe homolognih karakterističnih krivulj za obravnavanje nezgodnih stanj.

5.0 Literatura

- 1./ Streeter V.: Hydraulic Transients, McGraw Hill, New York, 1967.
- 2./ Popović D.: Nuklearna energetika, Naučna knjiga, Beograd, 1978.
- 3./ Topical Report Reactor Coolant Pump Integrity in LOCA WCAPS163, Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh, 1973.
- 4./ RELAP5/MOD1 Code Manual, Volume 1; System Models and Numerical Methods-V.Rauson et al., EGG Idaho USA, 1980.