

M. Zeljko, M. Gregorič, G. Peterlin

INSTITUT "JOZEF STEFAN"
L J U B L J A N A

ANALIZA DELOVANJA UPARJALNIKA JEDRSKE ELEKTRARNE S PROGRAMOM RELAP5

ANALYSIS OF STEAM GENERATOR BEHAVIOUR IN NUCLEAR POWER PLANT WITH COMPUTER PROGRAM RELAP5

VSEBINA - Za analizo obnašanja tako kompleksnega objekta kot je jedrska elektrarna so potrebni veliki računalniški programi z detajlnimi modeli. Uporabili smo program RELAP5/MOD1/CYCLED01, razvit v Idaho National Engineering Laboratory. Pripravili smo vhodni model za analizo prehodnih pojavov v uparjalniku jedrske elektrarne Krško. Izkazalo se je, da ima ta verzija veliko napak, zato bomo v kratkem usposobili novejšo verzijo. Prve izkušnje nakazujejo vso kompleksnost problematike takih analiz tako s strokovnega kot tudi z ekonomskega stališča.

ABSTRACT - Analysis of nuclear power plant behaviour are made with large computer programs. We used RELAP5/MOD1/CYCLED01, which was developed in Idaho National Engineering Laboratory. Input model was prepared to analyse transients in steam generator of NPP Krško. We found out that this version had a lot of faults so we intend to implement a new cycle. First experience shows the whole complexity of such analysis, from technical and economical viewpoint.

1. UVOD

Za analizo varnosti jedrskih elektrarn smo na Odseku za reaktorsko in procesno tehniko Instituta Jožef Stefan poleg že obstoječih programov (RELAP4/MOD6, CONTEMP, BRUCH) usposobili še RELAP5/MOD1/CYCLED01. Vsi programi zahtevajo podrobno poznavanje procesov v jedrski elektrarni, njenih tehničnih podatkov, dejanske izvedbe in delovanja posameznih sistemov. Poleg tega je treba poznati tudi lastnosti programa in osnovne enačbe in predpostavke ter omejitve na ka-

terih je zgrajen model. Rezultati bodo omogočili neodvisno oceno varnosti jedrske elektrarne Krško in preveritev Westinghousevega projekta.

Postopek za uporabo paketa računalniških programov RELAP5 je razdeljen na 4 faze:

- Instalacija programskega paketa RELAP5 na računalnik CDC Cyber 172 na RRC
- študij fizikalnih in analitičnih osnov programa
- priprava vhodnih podatkov za celotno elektrarno
- uglasitev vhodnih modelov (inicializacija)

2. OPIS UPARJALNIKA

V uparjalniku se uparja voda sekundarnega kroga. Uparjalnik firme Westinghouse, model D4 je izveden kot menjalnik toplote s 4578 obrnjenimi U cevmi; njegova posebnost je vgrajen predgrelnik s križnim tokom in po modifikaciji maja 1982, deljeno napajanje: v predgrelnik in v recirkulacijski prostor. (slika 1)

Reaktorsko hladilo z visoko temperaturo teče v vstopno komoro na dnu uparjalnika, skozi U cevi v izstopno komoro. Sekundarna voda vstopa nad cevno ploščo v desni del uparjalnika - predgrelnik; od koder se v križnem toku med U cevmi dviga. V predgrelniku se voda intenzivno segreva največ do temperature nasičenja. Ko voda zapusti predgrelnik, teče vzporedno s cevmi in se uparja. V prostoru nad U cevmi, kjer ni več prenosa toplote iz primarnega v sekundarni krog, ima para suhost približno 0,5. V zgornjem, razširjenem delu so nameščeni primarni izločevalniki vlage, ki odstanijo večino kapljic iz pare. Nad njimi so sekundarni izločevalniki, ki izločijo skoraj vse preostale kapljice. (Minimalna suhost pare na izstopu iz uparjalnika je 0,9975.) Kapljevita voda, ki se izloči iz mokre pare v separatorjih, teče navzdol po povratnem kanalu. (Povratni kanal je obroč med ovojem snopa U cevi in zunanjo steno uparjalnika.) Nad cevno ploščo vstopa voda v levi del uparjalnika; se segreva; uparja in dviga. Levi in desni del uparjalnika sta pri dnu ločena s ploščo; oba tokova se združita nad predgrelnikom.

Prvotni Westinghousev projekt je predvideval, da bo celotna količina sekundarne vode pritekala v uparjalnik od spodaj. Izkaže se da pri veliki hitrosti sekundarne vode v predgrelniku cevi vibrirajo. Močne vibracije povzročijo udarce cevi ob podporne plošče; zaradi česar se po daljšem obratovanju obrabijo cevi. Zato je Westinghouse izvedel modifikacijo napajalne vode tako, da 30% napajalne vode dojava skozi zgornji napajalni priključek; skozi predgrelnik pa največ 70% nazivnega dotoka napajalne vode.

3. OPIS PROGRAMSKEGA PAKETA RELAP5/MOD1

Programski paket RELAP5 je bil razvit za popis lahko-vodnih reaktorjev (LWR), podvrženih nenadnim spremembam kot so izguba hladila pri velikih ali malih razpokah cevi, us-tavitvami črpalk, itd. Program RELAP5 izračuna iz petih enačb polja; ob upoštevanju enačbe stanja ter dveh konstitu-cijskih enačb, termohidravlične spremenljivke kot so tlak, hitrosti, gostote, suhosti, temperature na površinah, poraz-delitev temperatur in toplotne tokove.

RELAP5 je napisan v fortranu (90%) in zbirnem jeziku (10%). Uporablja dinamično lociranje spomina. Stevio vo-lumnov, toplotnih teles, proženj (tripov) in izpisov je od-visno od velikosti računalniškega spomina. Problemi s 150 hidrodinamičnimi volumni in 100 toplotnimi telesi uporabijo 270K SCM in 200 K LCM za vhodno procesiranje na računalniku CYBER 176.

3.1 Teoretične osnove

Osnovne enačbe na katerih je zasnovan RELAP5 je pet dvo-faznih enačba polja:

- kontinuitetna enačba za plinsko fazo,
- kontinuitetna enačba za kapljevito fazo,
- gibalna enačba za plinsko fazo,
- gibalna enačba za kapljevito fazo,
- energijska enačba.

Za izražanje gostote sistema in parcialnih veličin v odvisnosti od spremenljivk stanja (tlak, suhost pare in no-tranja energija) se uporabljajo enačbe stanja .

RELAP5 ima štiri konstitucijske relacije: za generacijo pare, medfazni upor, trenje ob steno in prenos toplote na steno. Te enačbe so empirične (z njimi predpišemo lastnosti snovi), v nasprotju z enačbami polja, ki izhajajo iz teo-rije. Enačbe za prenos toplote so razdeljene v skupino enačb za opis prisilne konvekcije in v skupino enačb za opis naravne konvekcije.

Dodani so tudi modeli za nenadne spremembe presekov, za dušenje, za reaktorsko kinetiko, model akumulatorja in črpalke ter ventilov.

3.2. Numerične metode

Pri numeričnem reševanju se diferencialna enačba pretvori v sistem diferenčnih enačb. Osnovnih 5 diferencialnih enačb se pred numeričnim reševanjem nekoliko predela, da jih je lažje pretvoriti v diferenčne enačbe.

Diferencialne enačbe temeljijo na konceptu masno-energijskega kontrolnega volumna, skozi katerega teče tekočina. Tu uporabimo kontinuitetno in energijsko enačbo. V takem modelu je treba definirati povprečne vrednosti veličin v volumnu in poznati je treba hitrosti na mejah volumna. Hitrosti definiramo s pomočjo momentnih kontrolnih volumnov, ki segajo od središča enega masno-energijskega volumna do središča naslednjega. Skalarne veličine (tlak, temperatura, suhost) definiramo v središču masno-energijskega volumna, vektorske veličine (hitrosti obeh faz) pa definiramo na mejah masno-energijskega volumna (na spojih). Rezultat takega pristopa je enodimenzijski sistem vozlišč.

V program je vgrajena kontrola časovnega koraka. Če v nekem koraku napaka prekorači zgornjo predpisano mejo, se ta rezultat črta, do boljšega rezultata pa se skuša priti s polovičnim časovnim korakom. Če je napaka manjša od spodnje predpisane meje, se naslednji izračun opravi pri podvojenem časovnem koraku.

4. MODELIRANJE S PROGRAMOM RELAPS

Uparjalnik najprej razdelimo na diskretne volumne, ki so med seboj povezani s spoji. Na začetno vprašanje, koliko volumnov je treba uporabiti za ponazoritev določenih delov sistema, je težko odgovoriti; lahko se poda le nekaj splošnih smernic. Pri danem sistemu in določenem času simulacije se s povečevanjem števila volumnov in zmanjševanjem časovnih korakov aproksimacija s končnimi diferencami približuje originalnim diferencialnim enačbam. Število volumnov zavisi od sistema, ki ga želimo modelirati, pa tudi od simuliranega prehodnega pojava. Za postavitev ustreznega modela je zato potrebno imeti precej izkušenj. Splošno velja pravilo, naj razlike v velikosti sosednjih volumnov ne bodo prevelike (slika 2).

4.1. Koncept volumnov in spojev

Programska izvedba hidrodinamičnih izračunov je organizirana z volumni in spoji - komponentami. Sistem, ki ga simuliramo, razdelimo v volumne in spoje; vsak spoj povezuje po dva volumna. Pri vsakem volumnu podamo usmeritev (smer toka tekočine: navpična, vodoravna, poševna); pri spojih pa povemo, katera dva konca volumna povezuje spoj in v kateri smeri teče tekočina. Vsi volumni v programu RELAPS so enodimenzionalni. Za vsak volumen je treba v začetku navesti geometrijske podatke:

- dolžina volumna; pretočni presek in prostornino (dva od treh podatkov)
- kot vodoravne in navpične usmeritve
- sprememba višine volumna (uporabi se za izračun statičnega tlaka; predznak se mora skladati z navpično usmeritvijo)
- hidravlični premer
- hrapavost (po želji lahko zahtevamo ali naj program pri izračunu padca tlaka upošteva hrapavost sten ali ne)

Podati je treba še začetno termodinamično stanje:

- v enofaznem področju tlak in temperaturo
- v stanju nasičenja tlak ali temperaturo in suhost
- v primeru dveh faz, ki nista v ravnotežju; tlak; notranjo energijo in suhost (lahko podamo tudi koncentracijo bora in količino neukapljivega plina)

Pri spojih je treba podati:

- vstopni in izstopni volumen
 - pretočni presek spoja
 - koeficient izgub (če obstajajo poleg trenja ob stene in izgub ob spremembi prereza še kakšne dodatne izgube, npr. kolena) pri pretoku v pozitivni in v negativni smeri
 - ali je sprememba prereza med dvema volumnoma postopna ali nenadna
 - ali naj program v vsakem časovnem koraku kontrolira; če se je tok na spoju pospešil do kritične hitrosti
 - ali naj program računa hitrost pare in kapljevine posebej;
 - ali naj računa s povprečno hitrostjo
 - ali naj se v gibalni enačbi upoštevajo vsi členi (ob simuliranju prehodnih pojavov) ali naj se odvodi po času črtajo (kadar želimo doseči stacionarno stanje)
- Za opis začetnega stanja je treba navesti začetni pretok (ali hitrost) kapljevine in pare.

Vrste komponent, ki so uporabljene v modelu uparjalnika JE Krško:

Casovno odvisni volumen moramo uporabiti na mestih, kjer lahko fluid priteka v sistem ali iz njega izteka.

Casovno odvisni spoj lahko uporabimo tam, kjer točno poznamo hitrosti ali pretoke obeh faz v odvisnosti od časa, kar podamo v tabeli.

Samostojni volumen je en volumen v sistemu. Začetno termodinamično stanje podamo za čas 0, ko pa začne čas teči, se te veličine spreminjajo glede na dogajanje v sosednjih volumnih.

Enostavni spoj je spoj, ki povezuje dva volumna. Kot pri samostojnem volumnu podamo začetno stanje; izračun nadaljnjih stanj v času pa izvede program.

Cev in obroč sta sestavljena iz več volumnov in spojev. Cev lahko uporabimo za tiste dele sistema, ki nimajo razvejišč.

Razvejišče uporabimo, če je nek volumen povezan z več kot z dvema spojem.

Separator je zelo enostaven model izločevalnika vlage - predpostavljeno je, da iz separatorja izhaja suha para.

4.2. Modeliranje toplotnih prevodnikov

Toplotni prevodniki predstavljajo trdne dele termohidravličnega sistema, skozi katere se prevaja toplota med volumni. S toplotnimi prevodniki modeliramo npr. stene cevi in posod. Opišemo lahko 3 vrste geometrije: ploščo, valj in kroglo. Toplotni prevodniki so ponavadi v stiku z volumni, lahko so tudi z ene strani izolirani. Če toplota prehaja iz enega v drugi volumen, se količina prenešene toplote odšteje oziroma prišteje k notranji energiji sosednjih volumnov. Na posamezni volumen je lahko priključenih več toplot. prev. enake ali različne geometrije. Porazdelitev temperatur in prenos toplote se računa iz enodimenzijskih enačb prevoda toplote. Prevod toplote v pravokotnih koordinatah se računa v katerikoli smeri (smer predpišemo v vhodnih podatkih); v cilindričnih in krogelnih koordinatah pa v radialni smeri. Pri enodimenzijskem izračunu se predpostavlja, da ni sprememb temperature v ostalih dveh dimenzijah. V smeri prevoda toplote razdelimo toplotne prevodnike na enako ali različno velike intervale. Toplotni prevodnik je lahko sestavljen iz enega ali več materialov. Za vsak interval je treba podati tabelo ali funkcijo toplotne prevodnosti in volumske specifične toplote v odvisnosti od temperature. Podati moramo začetno porazdelitev temperatur na mejah med intervali. Pri menjalnikih toplote z več enakimi cevmi navedemo geometrijske podatke za eno cev; dolžina toplotnega prevodnika pa je vsota dolžin vseh cevi.

4.3. Kontrolni sistem

S kontrolnim sistemom je možno izraziti algebraične in navadne diferencialne enačbe; z njimi pa lahko simuliramo regulacijo sistemov jedrske elektrarne.

Kontrolni sistem je sestavljen iz več vrst kontrolnih komponent. Vsaka kontrolna komponenta definira kontrolno spremenljivko kot funkcijo časovno spremenljivih veličin v hidrodinamskih volumnih, spojih, toplotnih prevodnikih; lahko je kontrolna spremenljivka tudi funkcija drugih kontrolnih spremenljivk in tudi same sebe. Tako je možno iz kontrolnih komponent, ki opravljajo enostavne operacije, sestaviti obsežen regulacijski sistem.

Kontrolne komponente, uporabljene v regulaciji nivoja uparjalnika so:

- seštevanje-odštevanje
- množenje
- deljenje
- integriranje (tudi diferenciranje se da prevesti v integriranje)

5. PRIPRAVA VHODNIH PODATKOV

Primarni del uparjalnika smo razdelili na 10 volumnov. Na vходу in izhodu sta časovno odvisni volumen (300 in 304; v modelu celotne elektrarne bodo namesto njih cevi). Volumna 301 in 303 predstavljata spodnji del uparjalnika pred vstopom in za izstopom iz U cevi. Volumni 302 predstavljajo snop cevi; njihova višina je taka, da sovpadajo z mejami volumnov v sekundarnem krogu.

Sekundarni del je razdeljen na 12 volumnov. Kot pri primarnem krogu so tudi tu na vходу in izhodu časovno odvisni volumni (400, 410 in 408), ki bodo v prihodnosti nadomeščeni s cevmi. Volumna 402 in 403 predstavljata predgrelnik, volumni 401, 404 in 405 so različni predeli uparjalnika. Volumen 406 je izločevalnik vlage; para teče skozi volumen 407 ven iz uparjalnika; voda se iz volumna 406 izloča v volumen 409; nakar teče po povratnem kanalu 410 nazaj v volumen 401.

Geometrijske podatke za volumne in spoje dobimo iz načrtov in drugih dokumentov o JEK. Problemi nastanejo pri določanju začetne tlačne razporeditve v sistemu. Iz priložnika lahko zgolj približno izračunamo upore pri pretoku skozi uparjalnik; kajti navedene so le vrednosti za

tipične vrste uporov v hidrodinamičnih elementih, medtem ko so v uparjalniku upori večinoma netipični.

6. IZPIS IZ RAČUNALNIKA

Obdelava vhodnih podatkov teče v treh fazah. V prvi fazi se podatki prečitajo in shranijo. V drugi fazi se izvede začetna obdelava podatkov - ti se zberejo v dinamične grupe, katerih velikost je odvisna od obsežnosti obravnavane naloge in od izbranih računskih postopkov. V tretji fazi se konča obdelava podatkov in se izvede zahtevana inicijalizacija. Med vsemi tremi fazami program javlja morebitne napake, kljub napakam pa poskuša podatke obdelati do konca in na koncu javi ali je obdelavo uspešno zaključil ali je odkril napake.

Program ima obširen in zgoščen izpis rezultatov. V obširnem izpisu dobimo za nek čas t , izpis vseh vrednosti, ki jih program računa. V zgoščenem izpisu se v predpisanih časovnih intervalih izpišejo vrednosti, ki zanimajo uporabnika. Ta izpis je v obliki časovne tabele.

Ker so tabele nepregledne smo naredili program za Versatec risalnik, ki zriše zgoščen izpis. To nam omogoči dobro kontrolo dobjenih rezultatov.

7. ZAKLJUČEK

Prva uporaba računalniškega programa RELAP5/MOD1/CYCLE001 je pokazala vso obsežnost in zapletenost samostojnih varnostnih analiz jedrskih elektrarn. Tako velike programe, ki so jih sestavljale skupine strokovnjakov več let, je težko spoznati v detajle. Matematični modeli v njih so tako razdelani in imajo toliko različnih možnih izbir izračunov, da je podrobnejši študij dolgotrajen. Najboljši pristop k spoznavanju lastnosti takih programov je njihova intenzivna uporaba pri analizi znanih eksperimentalno obdelanih pojavov.

Pripravili smo vhodni model uparjalnika JE Krško. Po odpravi začetnih napak smo modelu dodali regulacijo nivoja v zgornjem bazenu (Vol. 409). Pri večkratnih zagonih smo preizkusili vpliv programskih kretnic na dobljene rezultate. Trenutno teče delo na inicijalizaciji, to je določanju začetnih vrednosti termohidravličnih veličin v posameznih volumnih in spojih. RELAP5/MOD1/CYCLE 001 nima avtomatsko inicijaliziranje kot npr. RETRAN, ali natančne analize pri času 0 kot npr. RELAP4/MOD6, iz katere je možno korigirati začetna hidravlična stanja v naslednjem zagonu programa. Zato je bilo potrebno program RELAP5 velikokrat zagnati z novimi začetnimi vrednostmi. Tipični primer je na sliki 3.

Izkazalo se je, da ima 1. cikel programa RELAP5/MOD1, ki je vgrajen v računalnik Cyber 172, še precej pomanjkljivosti in napak, tako da z njim žal ni možno simulirati prehodnih pojavov v modelu uparjalnika. Kmalu bo na RRC vgrajen (izbojšan) 18. cikel, s katerim se bo morda dalo dobiti uporabne rezultate.