

Danica Vuković

Združena elektroprivreda
Beograd, Carice Milice 2

KONTROLA PRELAZNIH STANJA REAKTORA U RADU
- PRIKAZ METODOLOGIJE -

CONTROL OF OPERATIONAL TRANSIENTS IN
POWER REACTORS - METHODOLOGY

SADRŽAJ - Uvođenjem nuklearnih elektrana u elektroenergetski sistem postavlja se i pitanje njihove mogućnosti da zadovolje zahteve tog sistema po pitanju promena snage. U radu je dat prikaz metoda za optimalno vodenje kontrolnih šipki kod promena nivoa snage u cilju kompenzacije efekata temperature i zatrovanja, odnosno kontrole prelaznih stanja. Za optimizaciju kontrole prelaznih stanja Xe^{135} primenjen je metod Pantrjagina, dok je za rešavanje dvogrupalnih trodimenzionalnih difuzionih jednačina primenjen metod Fainberg-Galanjina uz uvođenje aksijalnih harmonika fluksa. Posmatran je reaktor sa vodom pod pritiskom, trodimenzionalan, reflektovan u radijalnom pravcu, konačne visine.

ABSTRACT - By introducing the nuclear power stations in the electric power system, questions of their possibilities to satisfy system's demands arise. Control of operational transients (temperature and Xe^{135}) in power reactors, by determining the optimal control rod strategy is given. To optimized the Xe^{135} transients Pantryagin theorem of optimal processes is applied. For solving three dimensional, two-group diffusion equations the heterogeneous Feinberg-Galanin method with axial flux harmonics is adopted. An application of this formalism to a three-dimensional, finite cylindrical pressurised water reactor radially reflected is presented.

1. U V O D

Stalno rastuću potrošnju električne energije potrebno je pokriti izgradnjom novih elektroenergetskih objekata, odnosno izgradnjom novih hidro, termo i nuklearnih elektrana. Izbor vrste objekata koji će se graditi zavisi, pre svega, od prirodnih mogućnosti zemlje, a potom i od ekonomskih parametara - visine investicionih ulaganja, kao i troškova goriva. Polazne postavke za razvoj elektroprivrede baziraju se na daljem intenziviranju razvoja racionalnim korišćenjem domaćih energetske izvora, pridržavajući se principa najveće ekonomičnosti proizvodnje u elektroenergetskom sistemu kao celini.

Imajući u vidu strukturu postojećih objekata u našoj zemlji, planove izgradnje novih objekata i karakteristike potrošnje s jedne strane, kao i tehnno-ekonomske karakteristike pojedinih tipova elektrana s druge strane, jasno se nameće potreba angažovanja nuklearnih elektrana u baznom delu dijagrama opterećenja. I pored toga ne može se računati, posebno kada u pogonu bude više jedinica, da i pred nuklearne elektrane neće biti postavljeni zahtevi od strane elektroenergetskog sistema-dispečera za obustavu rada, odnosno startovanje ili prelazak sa višeg na niži nivo snage i obrnuto.

Ovakvi zahtevi elektroenergetskog sistema izazivaju u nuklearnoj elektrani pojavu prelaznih stanja i u ovom radu pažnja će biti posvećena samo ovim, tzv. spoljnim faktorima. Unutrašnji uticaji koji, takođe, mogu dovesti do pojave prelaznih stanja u radu nuklearne elektrane ovde neće biti analizirani.

2. PREDMET ANALIZE

Nuklearna elektrana je energetska postrojenje koje se, u principu, sastoji iz dva tehnološka sistema: nuklearnog sistema za proizvodnju vodene pare i sistema za proizvodnju električne energije. Deo sistema za proizvodnju električne energije, turbogeneratorsko postrojenje, se po koncepciji ne razlikuje od istih sistema kod klasičnih termoelektrana, te njegovo ponašanje kod pojave prelaznih stanja neće biti analizirano. Nuklearni sistem za proizvodnju pare po fizičkim principima i tehničkoj realizaciji predstavlja potpuno nov sistem. Ovaj sistem, čiji je najvažniji deo nuklearni reaktor, bitno je drugačiji od kotlovskog postrojenja klasičnih termoelektrana, zasnovan na novim tehničko-tehnološkim rešenjima, upotrebljenom materijalu, sistemu upravljanja i drugom. Zbog specifičnosti i razlika u odnosu na klasične energetske objekte interesantno je ponašanje ovog dela nuklearne elektrane u slučajevima pojave prelaznih stanja, kao i njihova kontrola.

Uspešno provođenje kontrole nuklearnih reaktora pretpostavlja brižljivo izučavanje statičkih i dinamičkih karakteristika kako samog reaktora, tako i nuklearne elektrane u celini. Nezavisno od različitih tehnoloških šema nuklearne, svi osnovni procesi koji se u njima odigravaju i koji određuju njene karakteristike mogu se razvrstati u sledeće tri grupe: neutronsko-fizički procesi, toplotni i termodinamički procesi i hidrodinamički procesi, s tim što toplotni procesi utiču na neutronsko-fizičke i hidrodinamičke procese.

Ako se posmatra samo reaktor sa svojim pripadajućim sistemima, onda se njegova regulacija može sprovesti promenama položaja kontrolnih šipki i promenama brzine cirkulacije hladioca. Naša pretpostavka je da posmatramo reaktor sa vodom pod pritiskom (PWR) i da je brzina cirkulacije hladioca u primarnom krugu

konstantna, a da se kontrola prelaznih stanja koja se javljaju u reaktoru pri promenama snage obavlja promenama položaja kontrolnih šipki. Vežano za promene snage reaktora u širokom opsegu u procesu eksploatacije, moguće je razlikovati sledeća stanja:

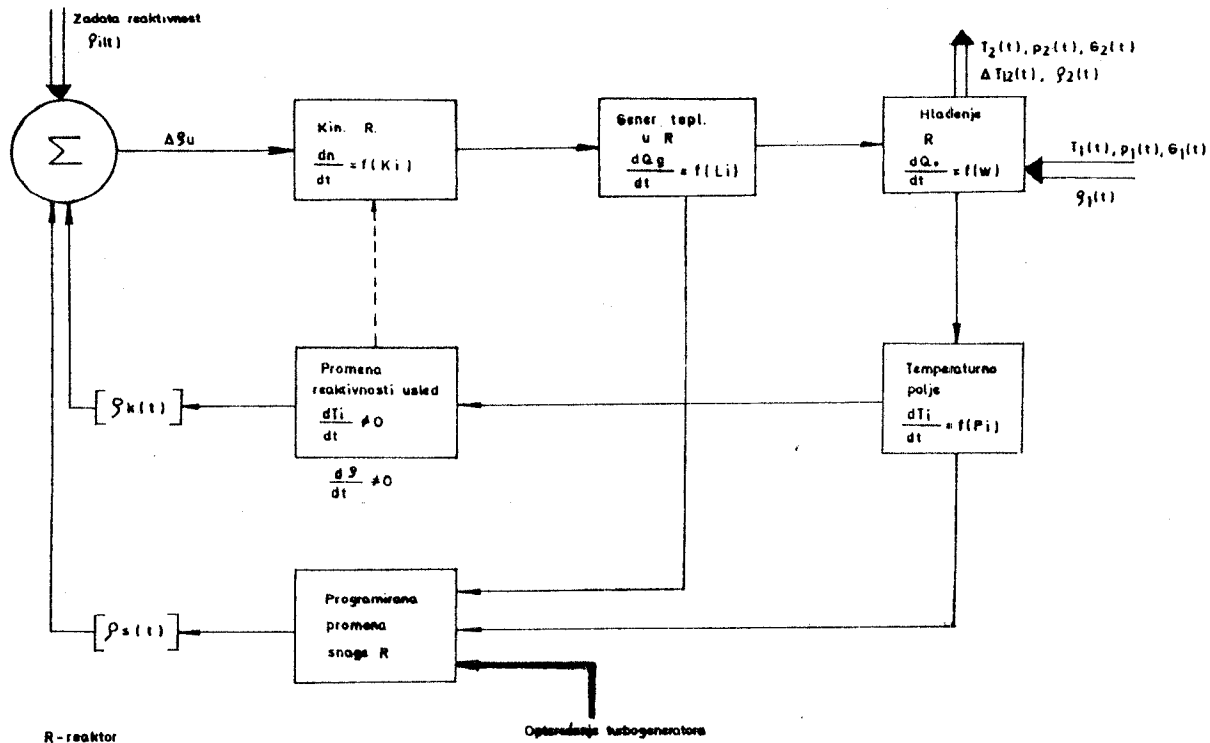
1. Zaustavljen-ugašen reaktor koji se nalazi u podkritičnom stanju, a čija je snaga određena snagom izvora neutrona i stepenom podkritičnosti.
2. Puštanje reaktora u pogon i postizanje željenog nivoa snage kada reaktor iz podkritičnog stanja prelazi u kritično.
3. Rad reaktora na različitim energetskim nivoima: nominalni ili niži.
4. Zaustavljanje reaktora ili snižavanje snage do nivoa koji se želi.

3. PRIKAZ METODA ZA ANALIZU PONAŠANJA REAKTORA

Predmet razmatranja u ovom radu je reaktor snage sa vodom pod pritiskom. Kod ovakvog reaktora dinamičke karakteristike raspodele snage određuju se u osnovi recipročnim vezama po temperaturi goriva i hladioca, kao i zatrovanjem produktima fisije, odnosno pri promenama snage dolazi do zadatih promena reaktivnosti, ali dolazi i do neželjenih promena reaktivnosti usled temperaturnih efekata i efekata zatrovanja, kako je to na datoj šemi uprošćeno prikazano.

Zadatak kontrole reaktora je da kompenzira neželjene promene reaktivnosti, što se postiže promenama položaja kontrolnih šipki. Od temperaturnih efekata razmatračemo promene temperature goriva i hladioca. Pri promenama snage reaktora koji je radio sa visokim fluksom neutrona, dolazi do zatrovanja usled generisanja fisionih otrova samarijuma, joda i ksenona. Poređenjem vremena raspada ovih elemenata, njihovih preseka za apsorpciju, kao i ravnotežnih koncentracija, vidi se da je uticaj ksenona najveći, te ćemo samo njega razmatrati. I dok se efekti koje izazivaju promene temperature odigravaju u realtivno kratkom vremenu i ne predstavljaju veliku smetnju ponovnoj promeni snage u suprotnom smeru, dotle pojava ksenona može da onemogući ponovne promene snage u trajanju od nekoliko sati, pa čak i do 40 časova. Zbog toga, kada dode do zaustavljanja reaktora koji je radio sa visokim fluksom neutrona, a koji je potrebno brzo ponovo pustiti u rad, neophodno je imati ili veću rezervu reaktivnosti ili postepeno i uz odgovarajuće proračune provoditi promenu snage reaktora da ne dode do bitnijeg nagomilavanja ksenona ¹³⁵. Ovaj problem moguće je rešiti optimiziranjem bilo vremena promene snage, bilo koncentracije ksenona.

Tako se pri prevodenju rada reaktora sa jedne na drugu snagu, pored kontrole prelaznih stanja javlja i problem optimizacije-minimizacije zatrovanja.



Ponašanje jezgra nuklearnog reaktora u prelaznim uslovima rada je veoma složeno, zbog uzajamnog delovanja nuklearnih, termičkih i strujno-dinamičkih procesa i prostorne neuniformnosti parametara reaktora. Ova činjenica isključuje mogućnost kompleksnog modeliranja cele zapremine reaktora za čitav spektar prelaznih stanja. Zbog toga se u pristupu modeliranju ponašanja reaktora danas sve više prilazi sa ciljem razvoja specifičnih analitičkih modela, koji su u stanju da potpunije kvantifikuju efekte najuticajnijeg faktora za stanje reaktora u prelaznim stanjima reaktora u radu.

Jedan takav pristup prikazan je u ovom radu. Posmatrani problem rešava se na sledeći način. Posmatra se trodimenzionalni reaktor, odnosno za rešavanje dela problema reaktor sa usrednjenim parametrima, kod koga se pretpostavlja da se ponašanje u vremenu može opisati kinetičkom jednačinom, s uzimanjem u obzir efekata zakasnelih neutrona i da se termički parametri goriva i hladioca razmatraju za srednje toplotno opterećeni "grejni" kanal, a temperatura i pritisak hladioca na ulazu u reaktor su konstantni:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i Q_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} \cdot n(t) - \lambda_i Q_i(t), \quad i=1, \dots, 6$$

Promena reaktivnosti usled promena temperature goriva i hladioca i zatrovanja reaktora opisuju se sledećom relacijom:

$$\rho(t) = \left[\sum_{i=1}^N \rho_i(t) - \rho_0 \right] + \alpha_g [\bar{T}_g(t) - T_{g,0}] + \alpha_n [\bar{T}_n(t) - T_{n,0}] + \rho_{Xe}(t) \left[\frac{\lambda_{Xe}(t)}{\lambda_{Xe}} - 1 \right]$$

pri čemu su:

$$\frac{d\bar{T}_g(t)}{dt} = a_1 \bar{q} + a_2 [\bar{T}_g(t) - \bar{T}_n(t)]$$

$$\frac{d\bar{T}_n(t)}{dt} = b_2 [\bar{T}_g(t) - \bar{T}_n(t)] - b_3 [\bar{T}_n(t) - T_{n,i}(t)]$$

$$\frac{d\lambda_{Xe}(t)}{dt} = \lambda_x \sum_f \phi(t) - \lambda_I I(t) - G_I I(t) \phi(t) - [\lambda_x + G_x \phi(t)] X(t)$$

* Zbog ograničenog broja stranica od strane organizatora i obimnosti matematičkih simbola, u radu se posebno ne prezentira značenje svakog simbola. Korišćeni su uobičajeni simboli koji su prihvaćeni u našoj i svetskoj literaturi.

Paralelno sa rešavanjem ovog sistema jednačina, neophodno je optimizirati vreme prelaska sa jednog na drugi nivo snage, tako da se ne prede dozvoljena koncentracija zatrovanja ksenonom 135. Za rešavanje ovog problema moguće je primeniti razne metode optimizacije, ali je u ovom radu primenjen metod Pantragina, i to princip minimalnog vremena. Primenom ovog metoda dobija se sledeća relacija, koja označava maksimalnu vrednost koncentrisanog ksenona 135:

$$X_{\max} = \frac{1}{\delta} \frac{(I(\bar{r}, 0) - a) \delta / \delta^{-1}}{X(\bar{r}, 0) \delta (1-\delta) + \delta [I(\bar{r}, 0) - a] - (1-\delta)b^{1/\delta-1} - \frac{b}{\delta}} \quad (2)$$

Vreme prelaska sa jednog nivoa snage na drugi, koje određuje elemente ove relacije je optimalno vreme T i ono ulazi u relaciju (1) kao polazni, odnosno granični podatak.

Sada se zadatak prevodenja reaktora, koji radi stacionarno sa gustinom neutrona n, na novi nivo snage, odgovarajuće gustine neutrona n_1 , gde je "a" konstanta, svodi na zahtev da integral

$$\int_0^T \rho(t)^2 dt \quad (3)$$

bude minimalan. Vreme prelaska je fiksirano i određeno iz relacija za ksenonsko zatrovanje, a iz relacija (1) i (3) određuje se vrednost kritičnog parametra, u ovom slučaju reaktivnosti reaktora u trenutku T.

Za praktično provođenje kontrole prelaznih stanja u minimalnom vremenu T i za odgovarajuću vrednost reaktivnosti potrebno je odrediti promene položaja kontrolnih šipki pri promeni nivoa snage. U cilju rešavanja i ovog problema za slučaj posmatranog cilindričnog reaktora konačnih dimenzija sa reflektorom u radijalnom pravcu postavljaju se trodimenzionalne dvogrupne difuzione jednačine za aktivno jezgro sa kontrolnim šipkama kao linijskim ponorima neutrona:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Psi(\bar{r}, t) - \kappa_1^2 \Psi(\bar{r}, t) + \frac{k}{\rho_c} \frac{\sum_2}{D_1} \Phi(\bar{r}, t) - \frac{1}{D_1} \sum_{n=1}^N \gamma_{1n} \Psi_n(z, t) \delta(|\bar{r} - \bar{r}_n|) &= 0 \\ \nabla^2 \Phi(\bar{r}, t) - \kappa_2^2 \Phi(\bar{r}, t) + \frac{\sum_1}{D_2} \rho_c \Psi(\bar{r}, t) - \frac{\sum_x}{D_2} \Phi(\bar{r}, t) - \frac{1}{D_2} \sum_{n=1}^N \gamma_{2n}(z) \Phi_n(z, t) & \quad (4) \\ \delta(|\bar{r} - \bar{r}_n|) &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{gde su } k = \frac{k_{\infty}}{k_{\text{eff}}}; \quad \kappa_1^2 = \frac{\sum_1}{D_1}; \quad \kappa_2^2 = \frac{\sum_2}{D_2},$$

kao i odgovarajuće jednačine za reflektor:

$$D_{1R} \nabla^2 \Psi_R(\vec{r}, t) - \Sigma_{1R} \Psi_R(\vec{r}, t) = 0$$

(5)

$$D_{2R} \nabla^2 \Phi_R(\vec{r}, t) - \Sigma_{2R} \Phi_R(\vec{r}, t) + \Sigma_{1R} \Psi_R(\vec{r}, t) = 0.$$

Za rešavanje ovog sistema jednačina primenjen je heterogeni metod Fainberg-Galanjina uz uvođenje aksijalnih harmonika fluksa, tako da se rešenja za epitermalni i termalni fluks dobijaju u sledećem obliku:

$$\Psi(\vec{r}, t) = \sum_{p=1}^{\infty} \sin(p \frac{z}{H}) \cdot \left\{ \sum_{n=1}^N F_{1n}^p [F_1^p(\rho_n)] - \sum_{k=-\infty}^{\infty} G_{1k}^p(r) \cos k(\theta - \theta_n) \right\} + \left\{ \sum_{n=1}^N F_{2n}^p [F_2^p(\rho_n)] - \sum_{k=-\infty}^{\infty} G_{2k}^p(r) \cos k(\theta - \theta_n) \right\} \quad (6)$$

$$\Phi(\vec{r}, t) = \sum_{p=1}^{\infty} \sin(p \frac{z}{H}) \cdot \left\{ \sum_{n=1}^N F_{1n}^p [F_3^p(\rho_n)] - \sum_{k=-\infty}^{\infty} G_{3k}^p(r) \cos k(\theta - \theta_n) \right\} + \left\{ \sum_{n=1}^N F_{2n}^p [F_4^p(\rho_n)] - \sum_{k=-\infty}^{\infty} G_{4k}^p(r) \cos k(\theta - \theta_n) \right\}$$

Da bi se odredila vrednost kritičnog parametra sistema, u ovom slučaju dubina uronjenosti kontrolnih šipki, navedena rešenja za flukseve neutrona ispisuju se za kanal svake kontrolne šipke posebno, definiše se matrica sistema tih jednačina i postavlja uslov da sistem jednačina ima i drugih, osim trivijalnih, rešenja - determinanta sistema jednačina mora biti jednaka nuli.

4. ZAKLJUČAK

Kod reaktora u radu pri promeni nivoa snage, zaustavljanju ili startovanju dolazi do pojave tzv. prelaznih stanja. Ova stanja se, u slučaju reaktora sa vodom pod pritiskom, manifestuju preko promena temperatura goriva i hlađioca i promena koncentracije produkata fisije, tj. promenama zatrovanja. Zadatak kontrole prelaznih stanja je da na optimalan način kompenzira njihov uticaj, odnosno neželjene promene reaktivnosti reaktora, što se postiže promenama položaja kontrolnih šipki. Sa aspekta potreba elektroenergetskog sistema potrebno je osposobiti reaktor da u najkraćem mogućem roku bude u mogućnosti da reaguje na novi zahtev za promenu snage.

U radu je dat prikaz primenjenih metoda za rešavanje ovog problema. Posmatran je realan reaktor, trodimenzionalan, reflektovan u radijalnom pravcu i ograničene visine.

Zbog činjenice da promene temperature i zatrovanja imaju različite vremenske efekte na reaktivnost, odnosno mogućnost vraćanja reaktora na prethodni nivo snage, čitav problem je podeljen i rešavan u okviru tri celine. Izvršena je optimizacija efekata zatrovanja određivanjem minimalnog vremena za prelaz sa jednog na drugi nivo snage reaktora, uz uslov da se ne prekorači određena, unapred data, koncentracija ksenona 135. Na taj način je fiksirano vreme na osnovu koga je uz primenu kinetičke jednačine sa jednom grupom zakasnelih neutrona određena vrednost kritičnog parametra sistema - reaktivnosti. Na kraju se u trećoj celini za dato vreme i izračunatu reaktivnost određuje položaj kontrolnih šipki.

Dalji rad u ovoj oblasti biće izrada računarskih programa na osnovu prikazane metodologije u cilju dobijanja praktičnih mogućnosti za prevođenje reaktora, odnosno nuklearne elektrane, sa rada na jednom nivou snage na drugi na optimalan način, odnosno u najkraćem mogućem vremenu.

5. LITERATURA

1. Rosztoczy and Weaver: Nuclear Sci.Eng., 20, 318 (1964)
2. Pontryagin, Boltyanski, Gamkneliobze and Mischenko: The Mathematical Theory of Optimal Processes, Interscience Publishers, New York (1962)
3. Roberts and Smith: Nucl. Sci.Eng 22, 470 (1965)
4. Vuković: Atomkernenergie, 17, 235 (1971)
5. Vuković: Atomkernenergie, 20, 37 (1972)
6. Emeļjanov, Efanov, Konstantinov: Naučno-tehničke osnove upravljenija jadernimi reaktorami, Moskva, Energoizdat (1981).