

Simulace provozu JE typu VVER – 440

H. Komárková

M. Šašková

Katedra jaderných reaktorů FJFI ČVUT

komarkova.hanka@gmail.com

Monica.Q@seznam.cz

Abstrakt:

Tento článek se zabývá reaktorem typu VVER – 440, jeho primárním a sekundárním okruhem a simulací jeho provozu. Jsou zde z hlediska simulace popsány různé stavy reaktoru, jako je závislost mezi primárním a sekundárním okruhem nebo reakce havarijních systémů.

1 Úvod

Reaktor typu VVER – 440/V213 tlakovodní reaktor ruského typu, který se skládá z primárního a sekundárního okruhu. Tlakovodní reaktory jsou nejčastěji využívané reaktory v jaderných elektrárnách na světě. Typ VVER – 440 je lehkovodní reaktor s výkonem 440 MWe. U nás je využíván v JE Dukovany, kde byl na všech blocích výkon navýšen na 500 MWe.

Pomocí simulátoru je možné napodobit různé situace při řízení bloku elektrárny. Simulátor ovšem nedokáže napodobit situace úplně přesně a může se stát, že v rámci simulace lze dojít na hranice jeho platnosti. V rámci cvičení jsme simulovali několik základních i havarijních situací, jako ovládání výkonu reaktoru a turbogenerátorů nebo havárii na primárním okruhu bez možnosti poškození skutečných zařízení.

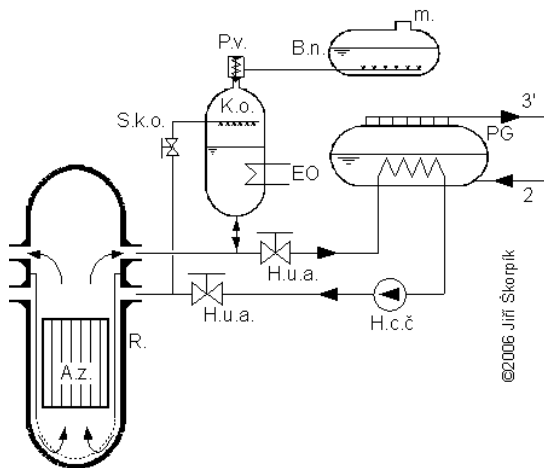
2 Reaktor typu VVER – 440/V213

Primární okruh

Aktivní zóna reaktoru se skládá z 312 palivových kazet a každá z nich je tvořena ze 126 palivových proutků. Tyto palivové proutky jsou tvořeny oxidem uraničitým, který je obohacen uranem 235 až na 5%. V aktivní zóně probíhá štěpná reakce, při které se pomocí tepelných neutronů štěpí jádro uranu. Většinou se atom rozštěpí na dva další atomy a 2 – 3 rychlé neutrony, které je potřeba pomocí moderátoru zpomalit, aby se zvýšila hodnota mikroskopického průřezu. Díky tomu je pravděpodobnost rozštěpení dalšího atomu několikanásobně větší.

Jako moderátor a chladivo aktivní zóny zároveň se používá lehká voda, do které je přidána kyselina boritá (až 6g/kg). Tato voda chladí palivové tyče a odvádí teplo z aktivní zóny. Zahřátá voda se dostane horkou větví do parogenerátoru, kde předá teplo do sekundárního okruhu. Každý reaktor VVER - 440 má 6 horizontálních parogenerátorů, kde se

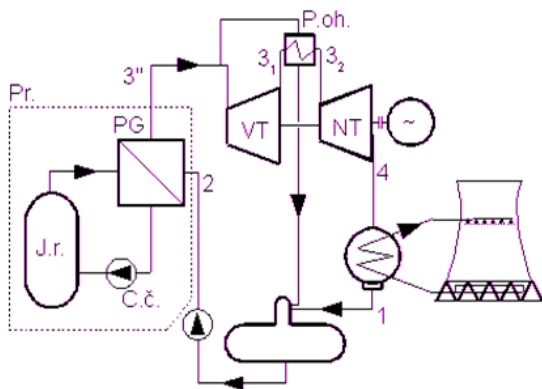
voda, která se v reaktoru zahřála na hodnotu kolem 290 °C, ochladí přibližně o 30°C. Dále je pomocí hlavního cirkulačního čerpadla na studené větvi hnána zpátky do reaktoru, kde se opět ohřeje. Schéma primárního okruhu viz Obr. 1.



Obr. č. 1: Schéma primárního okruhu VVER – 440, [1]

Sekundární okruh

V jaderné elektrárně dochází k transformaci tepelné energie stejným způsobem, jako například v uhelných elektrárnách, pouze zdroj tepla je zde velmi odlišný. Sekundární okruh je tvořen klasickým Rankin – Clausiovým cyklem a technologiemi k němu příslušícími. Voda v parogenerátoru se díky přivedenému teplu z primárního okruhu mění v páru. Ta je nejprve vedena na vysokotlaký díl turbíny, poté je vedena přes separátor vodní páry a přehřívána. Dále expanduje na nízkotlakých dílech turbíny a je vedena do kondenzátoru, kde zkondenzuje. Tento kondenzát je veden přes kondenzátní čerpadlo na systém nízkotlaké regenerace, poté do napájecí nádrže. Z napájecí nádrže je kondenzát nasáván napájecím čerpadlem do vysokotlaké regenerace a přes ni opět do parogenerátoru. Schéma sekundárního okruhu viz obr. č. 2.



Obr. č. 2: Schéma sekundárního okruhu VVER - 440 [1]

3 Simulace provozu

Simulátor

Simulátor je zařízení, které napodobuje chování skutečného reaktoru. Díky němu můžeme sledovat reakce zařízení na různé podněty bez toho, aby bylo nutné využívat skutečné

zařízení. Simulátor má ovšem na rozdíl od skutečného zařízení určité hranice. Může být používán k simulaci různých nehod nebo poškození, které by na skutečné elektrárně způsobily obrovské škody.

Simulace snížení výkonu od primárního okruhu k sekundárnímu

Systém automatické regulace výkonu bloku je nastaven tak, že pokud se sníží výkon v primárním okruhu (výkon reaktoru řízen systémem RCS), výkon turbogenerátoru (řízen systémem TVER) reaguje a také snižuje výkon. Tato vazba je dána tlakem v hlavním parním kolektoru a funguje i naopak. Naše simulace se zabývala řízením sekundárního od primárního.

Simulace začínala nastavením na nominální výkon. Poté byl přepnut TVER turbogenerátor č. 1 do režimu udržujícím tlak v hlavním parním kolektoru a pomocí regulačních kazet se začal snižovat výkon reaktoru. Teplota vody vstupující do reaktoru zůstávala téměř stejná, ovšem kvůli snížení výkonu reaktoru se neohřívala na původní hodnotu, proto její teplota postupně klesala. Tím se snížil i rozdíl teplot a střední teplota chladiva. Na snížení výkonu reaktoru a teploty vody začal reagovat i sekundární okruh snížením výkonu turbogenerátoru č. 1. Výkon druhého turbogenerátoru zůstával stále na poměrně stejné hodnotě (216,0 MW±1,0MW). Tabulka č. 1 jasně znázorňuje změny hodnot.

Tabulka č. 1:

Čas (s)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
Pozice reg. kazet (cm)	190	178,6	170,2	163,4	152,8	146,2	137,4	131,4	119,2	111,4
Výkon reaktoru (%)	100	94,4	88,8	85,8	78,5	75,1	68,4	65,0	57,0	51,7
Výkon turbogen. č. 1 (MW)	224	201	183	164	148	124	103	88	52	33
T_i (°C)	265,6	265,0	265,0	264,7	264,4	264,2	263,8	263,5	263,0	262,7
T_o (°C)	295,5	293,7	292,5	290,9	289,5	287,7	286,2	284,3	281,8	280,4
ΔT (°C)	29,9	28,7	27,5	26,2	25,1	23,5	22,4	20,8	18,8	17,7
$T_{stř}$ (°C)	280,6	279,4	278,8	277,8	277,0	276	275	273,9	272,4	271,6

T_i – teplota vody vstupující do reaktoru; T_o – teplota vody vystupující z reaktoru; ΔT – rozdíl teplot T_i a T_o ; $T_{stř}$ – střední teplota vody v reaktoru

Simulace havárie pojistných ventilů kompenzátoru objemu

Kompenzátor objemu je zařízení na primárním okruhu, které v něm pomáhá vyrovnávat změny tlaku a udržovat ho na stabilní hodnotě (12,26 MPa). Skládá se z nádoby kompenzátoru objemu, barbotážní nádrže, pojistných ventilů a ohříváků.

V naší simulaci havárie došlo k otevření pojistných ventilů a pára začala unikat do hermetického prostoru okolo primárního okruhu. V důsledku toho se začal v primárním okruhu snižovat tlak. Nejdříve se zapnuly ohříváky, které se snažily ohřátím vodu odpařit. Vzniklá pára měla vyrovnat snižující se tlak v primárním okruhu, únik byl ale příliš velký. Po nějaké době se zapnuly havarijní systémy HO-3 a HO-4, které regulovaly výkon reaktoru, začaly doplňovat chladivo a snažily se vykompenzovat pokles tlaku. Havarijní systémy HO-4 a HO-3 ovšem nedokázaly jeho klesání zabránit, spustil se havarijní systém HO-1, díky kterému byly spuštěny celé havarijní kazety do aktivní zóny, a tím se zastavila štěpná reakce. Na tento děj zareagoval sekundární okruh snížením svého výkonu. Přehled v tabulce č. 2.

Při této simulaci bylo patrné, jak havarijní systémy fungují. Ve skutečnosti by únik trval mnohem delší dobu a díky doplňování chladiva by obsluha elektrárny měla čas nějakým způsobem reagovat.

Tabulka č. 2:

Čas (s)	p (MPa)	L (cm)	Pozice regulačních kazet (cm)	Výkon reaktoru (MWe)	T _{stř} (°C)	T _{ko} (°C)
70	12,22	570,2	190,0	100,1	280,9	325,9
90	11,92	563,7	190,0	99,8	280,6	232,9
110	11,38	548,5	190,0	100,0	280,4	320,3
130	10,83	521,3	162,2	86,8	279,5	316,6
150	10,22	471,8	122,2	64,5	275,1	312,4
170	9,62	425,2	82,2	40,4	270,2	308,0
190	9,03	374,9	0,0	1,5	264,7	303,2
210	8,56	366,2	0,0	0,5	261,1	299,4
240	7,86	378,6	0,0	0,2	259,8	293,7
270	7,21	416,9	0,0	0,1	259,9	287,7
300	6,68	454,4	0,0	0,0	256,2	282,5

L – výška hladiny v kompenzátoru objemu; T_{ko} – teplota vody v kompenzátoru objemu

3 Shrnutí

Díky simulátorům jsme mohli simulovat různé situace, na kterých jsme si ověřili provázanost systémů primárního a sekundárního okruhu. Při naší práci na simulátoru jsme si také vyzkoušeli náročnost práce operátorů v jaderné elektrárně. Mohli jsme si vyzkoušet její bezpečnost, protože ať už jsme dělali cokoli, havarijní systémy vždy zasáhly takovým způsobem, aby nedošlo k poničení reaktoru nebo úniku radiace do okolí.

Poděkování

Děkujeme Katedře jaderných reaktorů FJFI ČVUT za možnost používání simulátorů, dále Ing. Dušanu Kobylkovi, Ph. D. za uvedení do problematiky jaderných reaktorů a také pořadatelům týdne vědy, kteří nám dali příležitost se tohoto projektu účastnit.

Reference:

- [1] ŠKORPÍK, J.: *Transformační technologie*, 18. 6. 2013, <http://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energetika.html>
- [2] GIECI, A. – MACKO J.: *Vedení výcviku na SPVS EDU (Odborná studie) VUJE, a.s., 2004*
- [3] KOBYLKA, D.: *Prezentace projektu týdne vědy, Praha 2013*
- [4] ČEZ, a.s: *Miniencyklopedie – Jaderná energie 18. 6. 2013, <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/obsah.http>*