

Simulace jaderné elektrárny s reaktorem VVER-440

J. Slabihoudek¹, M. Rzehulka²

¹Gymnázium J. K. Tyla, Hradec Králové,

²Wichterlovo gymnázium, Ostrava-Poruba

jakub.slabihoudek@seznam.cz

20. června 2017

Abstrakt

Článek stručně seznamuje s jaderným reaktorem VVER-440 a simulací elektrárny na něm založené s využitím programu SimEd. Konkrétně popíšeme simulaci ručního snížení výkonu od reaktoru k turbíně, jehož průběh popíšeme z hlediska časového průběhu jednotlivých veličin popisujících stav primárního a sekundárního okruhu a činnosti jednotlivých systémů.

1 Úvod

U nákladných a složitých projektů, ke kterým jaderná elektrárna patří, je dobré mít předem jistotu, že daný návrh bude fungovat. Vzhledem ke složitosti řešení a množství fyzikálních jevů provázejících provoz je nutné používat počítačové simulátory. Takové kódy matematicko-fyzikálně řeší rovnice popisující fyzikální děje. Další výhodou simulátoru je pro výcvik. Na blokové dozorně elektrárny se chyby netolerují, na počítači to však nevádí, což z něj dělá skvělý výcvikový prostředek. Naše simulace sloužila k seznámení s reaktorem a poznání fyzikálních vztahů mezi jednotlivými veličinami (teploty, tlaky,...). Řešili jsme více úloh, včetně modelů některých havarijních stavů,

2 Jaderná elektrárna s reaktorem VVER 440

Budeme se zabývat elektrárnou s reaktorem typu VVER 440 (Vodou chlazený a Vodou moderovaný Energetický Reaktor) modifikací V213 (momentálně se používá např. v Dukovanech nebo Mochovicích). Reaktor je tlakovodní, proto se elektrárna člení na tři okruhy – na primární, sekundární a chladicí. V primárním je jaderný reaktor, který funguje jako zdroj tepla, v sekundárním je hlavně turbína a generátor realizující Rankin-Clausiusův cyklus, který vyrábí elektřinu, a chladicí okruh odvádí nízkopotenciální kondenzační teplo.

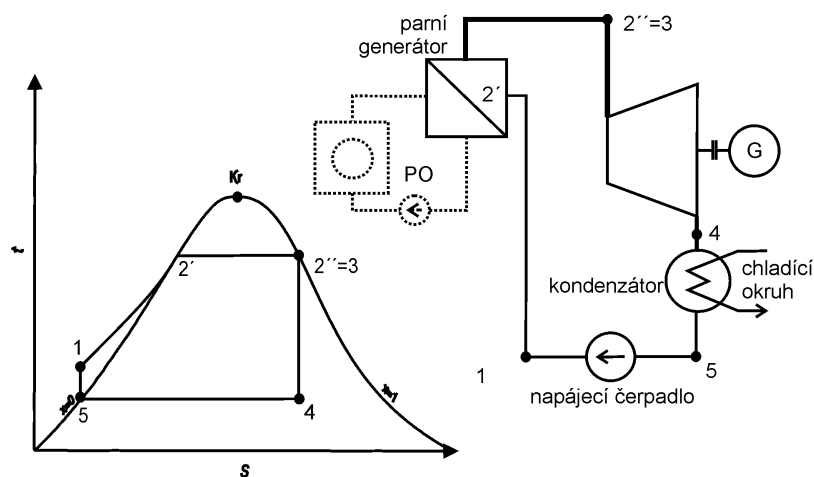
2.1 Primární okruh

V primárním okruhu se nachází reaktor, který díky v něm probíhající štěpné reakci ohřívá vodu, která je následně využita pro ohřev vody a tvorbu páry v sekundárním okruhu v parogenerátoru. Předáním tepla vodě v parogenerátoru se voda z primárního okruhu ochladí a je čerpána zpět do reaktoru. Jako palivo pro jaderný reaktor se používají tablety UO_2 .

Tablety jsou umístěny v palivových proutcích, které se skládají do palivových kazet. Tyto tablety jsou z více jak 95% tvořeny ^{238}U , dále je v nich zastoupen ^{235}U , kterým se musí uran obohacovat, a ve velmi malém množství i ^{234}U . Právě izotop ^{235}U se v reaktoru štěpí nejčastěji na dva štěpné produkty, dva až tři neutrony a na energii ve formě kinetické energie uvolněných částic, jejichž zpomalováním se kinetická energie přeměňuje na tepelnou energii paliva a moderátoru. Samotný reaktor, který je spolu s parogenerátorem umístěný v hermetickém boxu, je tlakovou nádobou, která obsahuje aktivní zónu, v níž probíhá štěpná reakce. Jeho výkon se reguluje pomocí regulačních tyčí, které jsou pro případ nouze doplněné bezpečnostními tyčemi, a změny koncentrace v chladivu rozpuštěné H_3BO_3 Jako moderátor pro neutrony ze štěpení slouží voda, která slouží i jako chladivo a je přímo uvnitř reaktoru. Tepelný výkon reaktoru je 1375 MW (na Dukovanech je dnes výkon 1444 MW - navýšeno díky projektovým rezervám). Na 1 reaktor připadá 6 smyček (okruh s parogenerátorem a hlavním cirkulačním čerpadlem). K reaktoru přísluší zařízení ke kompenzaci objemu a tlaku.

2.2 Sekundární okruh

Tento okruh začíná parogenerátorem, kde je vodou z reaktoru ohřívána voda na sytou páru, která roztáčí turbínu pohánějící generátor, který pak mechanickou energii turbíny přeměňuje na elektrickou energii. Pára z turbíny pak v kondenzátoru předává kondenzační teplo vodě chladicího okruhu. Zkondenzovaná voda pokračuje přes čerpadla a regenerační ohřev zpět do parogenerátoru. Hrubý elektrický výkon (bez odečtení spotřeby elektrárny) je 440 MW. Celý cyklus vody v sekundárním okruhu je Rankin-Clausiovým cyklem. Od bodu 5 k bodu 1 dochází ke zvýšení tlaku vody na čerpadle. Mezi body 1 a 2 dochází k ohřevu vody, od bodu 2 k bodu 3 je fázový přechod vody v páru. Mezi body 3 a 4 pára adiabaticky expanduje na turbíně. Od bodu 4 k bodu 5 probíhá kondenzace páry v kondenzátoru.



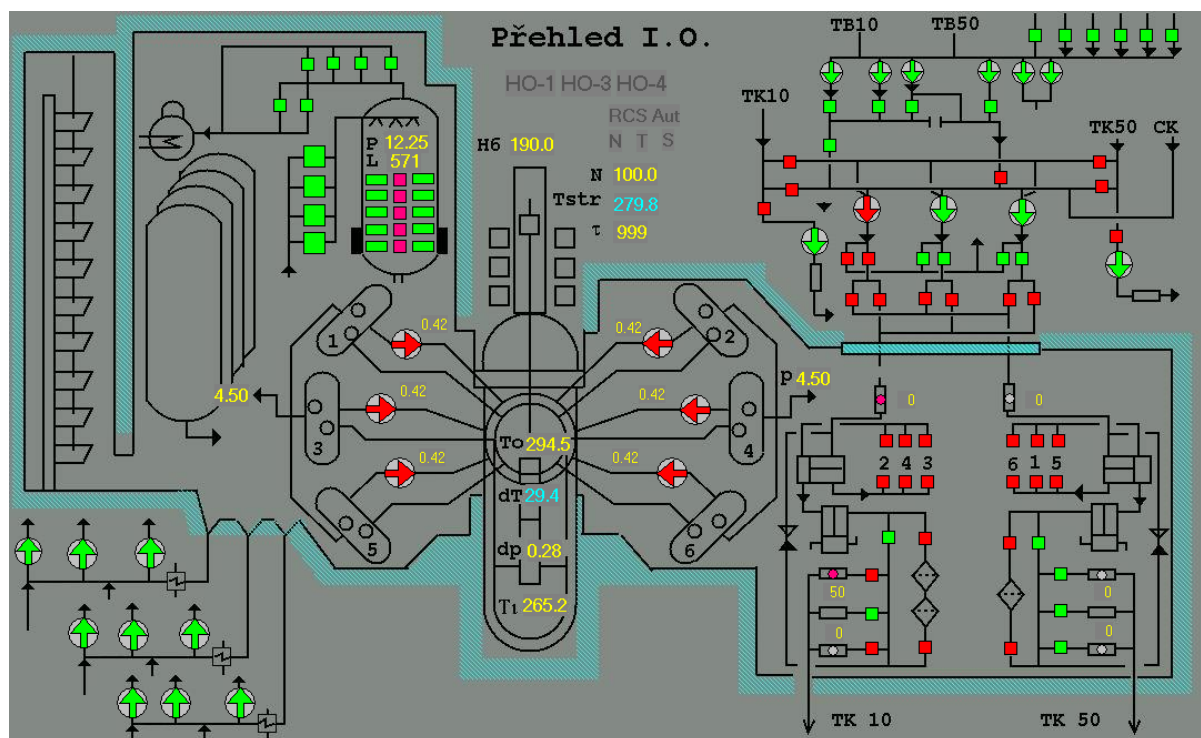
Obrázek 1: Základní Rankin-Clausiov cyklus v t-s diagramu a jeho zjednodušená realizace v sekundárním okruhu.

2.3 Terciální okruh

Účelem tohoto okruhu je přijetí kondenzačního tepla páry v kondenzátoru. Chladícím médiem je voda, která se při kondenzaci páry zahřeje a musí se zchladit v chladicích věžích.

3 Simulátor

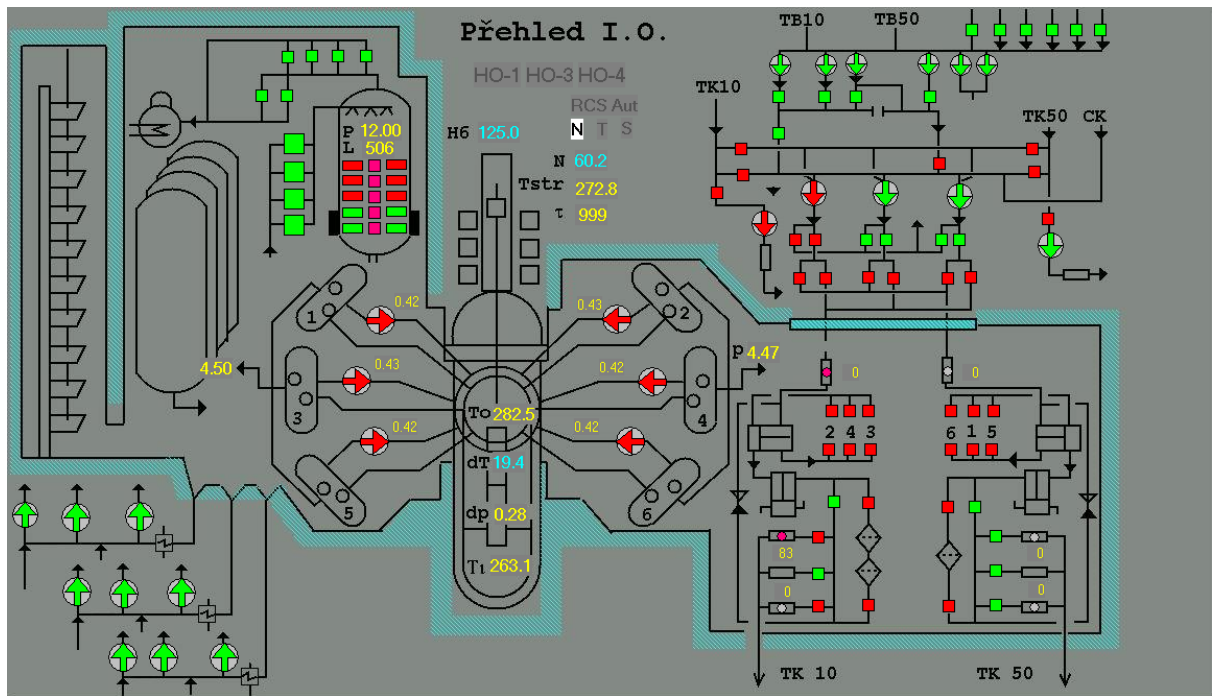
Simulátor, se kterým si zkusíme pracovat, se jmenuje SimEd, který je zjednodušeným a pro počítače upraveným simulátorem používaným ve výcvikových střediscích. Simulátor máme nainstalovaný na čtyřech počítačích. Dva počítače představují řízení primárního okruhu a dva umožňují kontrolu sekundárního okruhu. Jeden z počítačů prvního okruhu je serverovým a právě přes něj se celý simulátor spouští. V každém z okruhů jsou dva počítače z toho důvodu, aby mohl jeden sloužit jako řídicí pult, zatímco druhý počítač nám zobrazuje celkové schéma daného okruhu. Na schématech jsou červenou barvou zapnuté systémy, zelenou vypnuté.



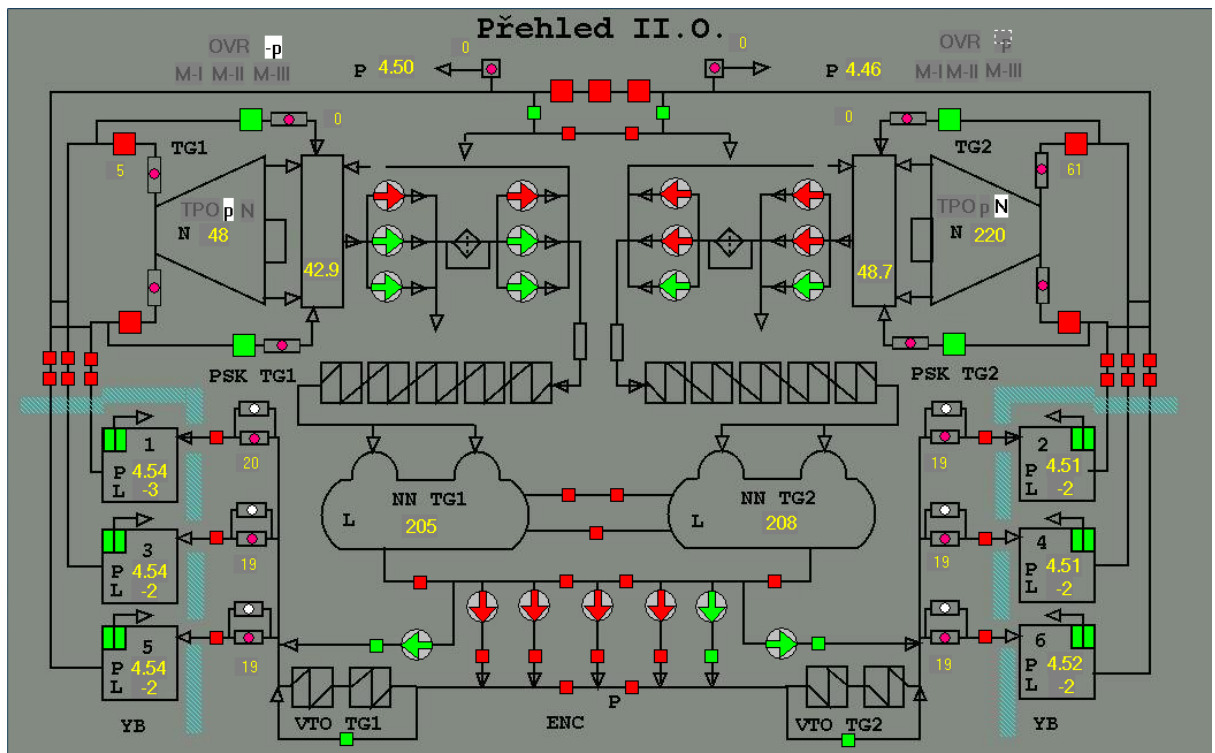
Obrázek 2: Prostředí programu SimEd - schéma primárního okruhu

4 Průběh simulace

Výchozí situace zahrnovala reaktor v nominálním výkonu řízený automaticky v režimu N, což znamená řízení za účelem udržování konstantního výkonu pomocí neutronového toku. Začíná se vypnutím -p korektoru (hlídá změny tlaku a v případě změny zasáhne) u druhého turbogenerátoru. Pak přepneme 1. turbogenerátor do režimu p, tedy výkon turbogenerátoru se upraví podle tlaku hlavního parního korektoru. RCS se přepne z režimu N (udržování výkonu) do ručního řízení výkonu "od reaktoru", tedy výkon regulujeme zasouváním řídicích tyčí 6. skupiny do aktivní zóny. Při zasunutí tyčí do reaktoru se snižuje počet neutronů v reaktoru (podkritický režim), tepelný výkon klesá a v důsledku toho klesne teplota chladiva na výstupu z aktivní zóny. S nižší střední teplotou primárního okruhu klesá objem a tlak chladiva. Tohoto si můžeme všimnout na kompenzátoru objemu. Při poklesu tlaku se zapnou elektroohříváky (topné spirály), z části vody se vytvoří pára a dojde ke zvýšení tlaku. Systém řízení udržuje konstantní tlak chladiva, aby vlivem vysoké teploty (pořád nad 270°C) nedošlo v primárním okruhu k varu.



Obrázek 3: Schéma primárního okruhu na konci simulace. Všimněme si zapnutých elektroohříváčů (červené obdélníky nahoře mírně vlevo). Modře zvýrazněné hodnoty jsou menší než normál - jde o výšku řídicích tyčí, změnu teploty chladiva při průchodu aktivní zónou a výkon reaktoru (v procentech nominálního).



Obrázek 4: Schéma sekundárního okruhu na konci simulace. Nápadný je pokles výkonu turbíny 1 (vlevo) a menší tlak a výška hladiny v parogenerátorech - 6 čtverců v dolních rozích.

Změny v primárním okruhu vyvolávají změny v sekundárním okruhu. Nižší teplota

chladiwa způsobuje menší výkon parogenerátoru (rychlost tepelné výměny je funkcí rozdílu teplot), proto vzniká méně páry, v důsledku čehož pozorujeme nižší tlak v parogenerátorech, rovněž hladina vody na sekundární straně parogenerátoru klesá. Na pokles tlaku v parním kolektoru reaguje řídicí systém turbogenerátoru. Snižuje se pouze výkon 1. turbíny (je v režimu p - viz výše). Vždy je snaha držet konstantní výkon turbíny, aby pracovala co nejúčinněji. Proto se reguluje jen 1 turbína a druhá má konstantní otáčky.

Po dosažení požadovaného výkonu reaktoru jsme přeprnuli do automatického režimu.

5 Shrnutí

Krom výše zmíněných úkolů jsme provedli více K našemu překvapení se jaderná elektrárna díky řídicím systémům řídí téměř sama, operátor na systémy "jen" dohlíží a zajišťuje mimořádné situace. Simulátor má k reálnému provozu dost daleko, na druhou stranu, je dobrým "startovním můstkem" pro studenty.

Poděkování

Předem bychom chtěli poděkovat Panu Ing. Dušanu Kobylkovi, Ph.D. za odborné vedení našeho miniprojektu, za ochotu, trpělivost a za cenné rady. Dále děkujeme FJFI za organizaci Týdne vědy.

Reference

- [1] Skupina ČEZ: Jaderná energetika [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/edu/technologie-a-zabezpeceni.html>
- [2] Obrázky ze simulátoru
- [3] KOBYLKA, Dušan. Technická termodynamika s řešenými příklady. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05902-9.