

A VERONA rendszer fejlesztése az emelt teljesítményű, gadolínium tartamú kazettákkal üzemelő zónatöltetek on-line monitorozásához

Pós István, Kálya Zoltán

Paksi Atomerőmű Zrt.,
7031 Paks, Pf. 71.

A paksi atomerőmű blokkjain a közelmúltban befejeződött a teljesítménynövelési folyamat első fázisa. Mind a négy blokk emelt, 1485 MW termikus teljesítményen üzemel. Mint köztudott, a teljesítménynövelés elnyerte a 2009. évi Innovációs Nagydíjat is.

Az emelt teljesítményen történő üzemelés – a hagyományos üzemanyag-kazetták alkalmazásával – azt eredményezte, hogy az üzemanyag-költségek az optimális értéknél nagyobbak lettek. A költségek optimális szintre való csökkentése új típusú, gadolínium kiégő mérget tartalmazó üzemanyag-kazetták bevezetésével érhető el. Ezt tekintjük a teljesítménynövelés második fázisának.

Mind a blokkok névleges teljesítményének megnövelése, mind a gadolínium tartalmú kazetták bevezetése – a szükséges biztonsági elemzések elvégzése mellett – a VERONA zónaellenőrző rendszer fejlesztését is igényelte. Erre egyrészt a növelt teljesítmény esetén a megnövekedett lokális teljesítmény- és hőmérséklet-paraméterek, másrészt az új kazetták eltérő neutronfizikai tulajdonsága miatt volt szükség. A gadolínium-tartalom szükségessé tette továbbá az in-core mérések, hőelemek és neutrondetektorok jelfeldolgozásának a fejlesztését is.

A cikkben bemutatjuk az on-line zónaellenőrzés során, a VERONA rendszerben alkalmazott reaktorfizikai és neutronfizikai modelleket és azok futási környezetét:

A gyorsan változó és a lassúbb folyamatok szétválasztását megalósító, párhuzamosan futó szinkron és aszinkron feldolgozás funkcióit

- a C-PORCA/HELIOS zónaszámító neutrondiffúziós/transzport modellt,
- a mért kazetta-felmelegedéseknek a nem mért pontokra való kiterjesztését végző GEPETTO modellt,
- az összes mért és számolt reaktorparamétert tároló RAR archív rendszert,
- a reaktorfizikusi ellenőrzést és a modellek validációját segítő VERONA-expert rendszer főbb feladatait.

A VERONA-ban alkalmazott modellek széleskörű tesztelésen estek át. A tesztek eredményei bizonyítják azok alkalmazhatóságát. A cikk keretében bemutatjuk a modellek számítási eredményeit a zónán belüli mérésekhez viszonyítva.

A fejlesztés eredményeképpen előálló VERONA v6.20 verzió alkalmazásának engedélyét a hatóság megadta, a rendszer jelenleg minden blokkon és az erőmű szimulátorában is üzemszerűen működik.

Bevezetés

Az atomerőművekben az aktív zóna folyamatos ellenőrzése igen fontos tevékenység, mert az üzemi tranziensek és az üzemzavarok kiinduló állapota alapvetően meghatározza a folyamat végeredményét. Más szavakkal a zónaellenőrzés során igazoljuk, hogy az aktív zóna paraméterei minden időpontban a biztonsági analízisek során meghatározott tartományban találhatók, ezzel garantálva az üzemzavarok megfelelő kimenetelét. Mivel a zóna teljesítményét korlátozó paramétereket a reaktor teljesítményének a megfelelő mértékű csökkentésével mindig az engedélyezett tartományba lehet vinni, ezért az on-line monitorozás során dől el a reaktor vihető maximális teljesítménye is.

A fentiekből egyértelműen kitűnik a zónamonitorozás fontossága a reaktor biztonsága szempontjából. Ha a biztonságos üzem mellett a gazdaságosságot is szem előtt tartjuk, akkor fontos figyelembe venni a töltettervezés és a zónaellenőrzés kapcsolatát. Ez alatt azt értjük, hogy ha ez a két tevékenység összhangban van, akkor a gazdaságossági és a biztonsági szempontokat figyelembe véve megtervezett töltet a zónaellenőrzés szerint is a maximális teljesítményen, biztonságosan üzemeltethető lesz.

A fenti feltételek megléte a paksi atomerőműben alkalmazott töltettervező és on-line zónaellenőrző reaktorfizikai modellekre vonatkozóan fontos előfeltétele volt a teljesítménynövelés megvalósításának.

Szerencsés körülmény, hogy a feladatok modellezését végző mindkét programrendszer hazai fejlesztésű, és így számítási pontosságuk, valamint szolgáltatásaik is folyamatosan javíthatóak. A fejlesztési folyamatot az egyre korszerűbb és így gazdaságosabb üzemanyag-kazettatípusok alkalmazása is generálja. Ez a folyamat figyelhető meg Pakson is, amely során a teljesítménynövelés úgynevezett második fázisában visszaállítjuk az üzemanyag-felhasználás korábbi gazdaságosságát a gadolínium tartalmú kazetták fokozatos alkalmazásával.

A paksi atomerőműben az on-line monitorozást a VERONA zónaellenőrző rendszerrel végezzük. Jelen dokumentum a teljesítménynövelés és a gadolínium tartalmú kazetták bevezetése kapcsán a VERONA modelljeiben megvalósított fejlesztések összefoglalását tartalmazza.

Az alkalmazott rövidítések:

VERONA: A paksi atomerőműben alkalmazott on-line zónaellenőrző rendszer.

RONA: A VERONA rendszerben a reaktorfizikai számításokat végző program neve.

HELIOS: A neutron és gamma transzportegyenletet megoldó program, amellyel hatáskeresztmetszeteket határozzunk meg a diffúziós modellek számára.

C-PORCA: Nodális és üzemanyag pálcánkénti diffúziós modell, amely a VERONA rendszerben a RONA program részeként fut, az off-line töltettervezés során pedig önálló program.

GEPETTO: Az in-core mérések és a nodális diffúziós modell felhasználásával perturbációs kiterjesztést végez, azaz a zóna aktuális állapotának a legjobb reaktorfizikai leírását adja.

Gd-2N: A Pakson használt gadolínium tartalmú kazettatípus elnevezése.

RPH szervert: A VERONA rendszerben a reaktorfizikai számítások, azaz a RONA program ezeken a gépeken fut.

RPhDB: A számítógépek memóriájában levő adatbázis, amely az aszinkron és a szinkron RONA programok, valamint az adatszerverek közötti adatkapcsolatot végzi.

GEM COMMON: A szinkron GEPETTO futáshoz szükséges mátrixelemek adatcsomagja.

HELIOS/C-PORCA zónamodell növelt teljesítményű gadolínium tartalmú kazetták számítására

A VERONA-ban, a hozzá hasonló [1], on-line monitorozó rendszerekkel analóg módon egy háromdimenziós (3D), két neutronenergia csoportban számoló diffúziós egyenlet megoldását végezzük. Az on-line rendszerben található, C-PORCA [2] nevet viselő diffúziós modell teljesen azonos a töltettervezés során alkalmazott modellel. A kétféle futás között csak a számítások inputjában van különbség. Az off-line számításokban a program inputjai a kampány tervezett üzemviteli paramétereit és annak tervezett menetét tartalmazzák, ezzel szemben az on-line futás során az aktuális zóna paramétereiket (belépő hőmérséklet-mező, rúdhelyzet, reaktorteljesítmény, zónahűtő-közeg forgalma)

vesszük figyelembe, beleértve a kampány valós történetét leíró, nóduszonkénti kiégés- és izotópkoncentráció-változást is. Azzal, hogy a kétféle feladatra azonos modellel alkalmazunk, elkerülhetjük a modellek különbözőségei által okozott hibát, amely a tervezés bizonytalanságát növelné.

A v6.20-as rendszerben a 3D nodális diffúziós számítás alapját egy saját fejlesztésű hibrid-véges elem módszert alkalmazó matematikai modellel alkotja, amely a számítások során a jól ismert statikus sajátérték egyenletet oldja meg. A modell részletes leírása a [3][4] hivatkozásban található meg.

A neutronfizikai modell megköveteli a különböző reaktorfizikai paraméterek értékeivel jellemzett üzemanyag-, reflektor- és abszorbernóduszok hatáskeresztmetszeteinek az ismeretét. Ezek a neutronreakciót meghatározó csoportállandók a program számára úgynevezett XS könyvtár-fájlokban vannak tárolva. A nódusz-hatáskeresztmetszeteket a lehetséges paraméterek függvényében a HELIOS transzport kóddal határozzuk meg, a diffúziós számításokat megelőzően. A HELIOS programmal meghatározott nóduszonkénti és üzemanyag-pálcánkénti alap-hatáskeresztmetszetek a következők:

D_1, D_2 - gyors és termikus diffúziós állandó,

Σ_1^a, Σ_2^a - gyors és termikus abszorpció,

$\nu\Sigma_1^f, \nu\Sigma_2^f$ - gyors és termikus fission hatáskeresztmetszet szorozva a hasadásonként keletkező átlagos neutronszámmal,

$\Sigma_1^{f,w}, \Sigma_2^{f,w}$ - gyors és termikus fission hatáskeresztmetszet szorozva a hasadásonként keletkező átlagos energiával,

Σ_1^f, Σ_2^f - gyors és termikus fission hatáskeresztmetszet,

Σ_{1-2}^s - korrigált gyors-termikus szórás.

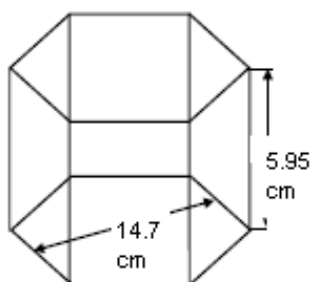
A fentiekben kívül még további mikroszkópikus hatáskeresztmetszeteket is meghatározunk a prométium-szamárium, a jód-xenon folyamat számításához, valamint abszorpció és (n,γ) hatáskeresztmetszeteket a transzurán izotópok számításához.

A fenti csoportállandók mindegyikére vonatkozóan egy ötdimenziós paraméterter rácspontjaiban rendelkezünk értékekkel. Ezen rácsponti értékek ismeretében kell meghatározni az adott csoportállandó értékét tetszőleges nóduszparaméter értékre. Ezt a feladatot az ötdimenziós tér minden dimenziójában két szomszédos paraméter rácspont által meghatározott ötdimenziós térfogatelem feletti multilineáris interpolációval oldjuk meg. A fenti interpoláció biztosítja a csoportállandók folytonos változását az egész vizsgált tartomány felett.

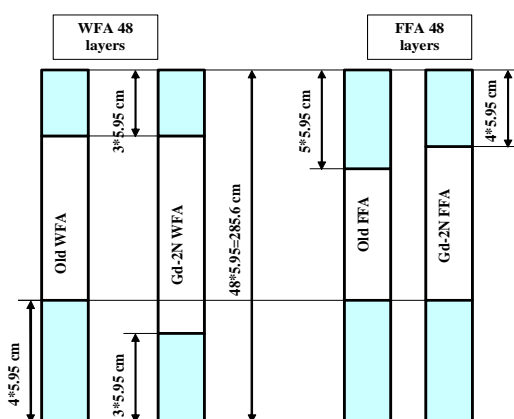
További programfejlesztést igényelt az a tény, hogy az új típusú, gadolínium kiégő mérget tartalmazó üzemanyagban az üzemanyag-pálcák a jelenleginél hosszabbak. Emiatt az úgynevezett átmeneti töltetekben (amikor a jelenlegi és az új üzemanyag kazetták együtt vannak a zónában) az új kazettákban az üzemanyag alsó vége lejjebb lesz, mint a jelenlegiben. Ez az elrendezés a szokásosnál bonyolultabb zónageometriát eredményez. Ha követni akarjuk a kialakult gyakorlatot, és a reaktorfizikai paramétereiket azonos

hosszúságú kazetta nóduszokra akarjuk megadni, akkor a kazetták hosszirányú felbontását a jelenlegi 20 axiális szintről 40-42 szintre kell növelni. Tovább bonyolódik a helyzet, ha a különböző hosszúságú üzemanyagpalcákat tartalmazó tölteteket ugyanazon programmal, folytatólagosan akarjuk számolni, ami egyébként bevett gyakorlat a töltettervezés során. Ekkor ugyanis a zóna aktív hosszát folyamatosan változtatni kellene, ami fölöslegesen bonyolítaná a helyzetet. A fenti probléma megoldására a C-PORCA programban egységesen 48, ugyanolyan hosszúságú axiális nóduszra bontottuk a kazettákat, a kazetták aljára és tetejére pedig nem sokszorozó agyagot tartalmazó ún. reflektor nóduszokat alkalmaztunk. A megoldás során előálló axiális diszkretizáció, valamint a v6.20 verzióban választható legkisebb nódusz méret az 1. és 2. ábrán látható. Az ábra szerint mind a régi és a Gd-2N munkakazetta (WFA), mind a régi és a Gd-2N követő kazetta (FFA) is 48 ugyanolyan hosszúságú axiális nóduszt tartalmaz.

A C-PORCA program által megvalósított számítás vezérlését és kapcsolatát a környezettel a 3. ábra mutatja. Az ábrán látható, hogy a lineáris sajátérték megoldása után újraszámoljuk a nóduszok neutronfizikai tulajdonságát jellemző hatáskeresztmetszeteket, és egy iterációs hurokkal visszatérünk a ciklus elejére. Ugyanez igaz az úgynevezett kritikus Cb iterációs hurokra is: ekkor a hőhordozó bórsav koncentrációját változtatjuk, amíg a neutronsokszorozás egységnyi nem lesz.



1. ábra: Nóduszméret



2. ábra: Axiális felbontás

A fentieket is figyelembe véve, összefoglalva a GD-2N üzemanyag esetében a következő főbb fejlesztéseket végeztük el a C-PORCA 3D diffúziós modellben a v6.10 rendszerhez képest:

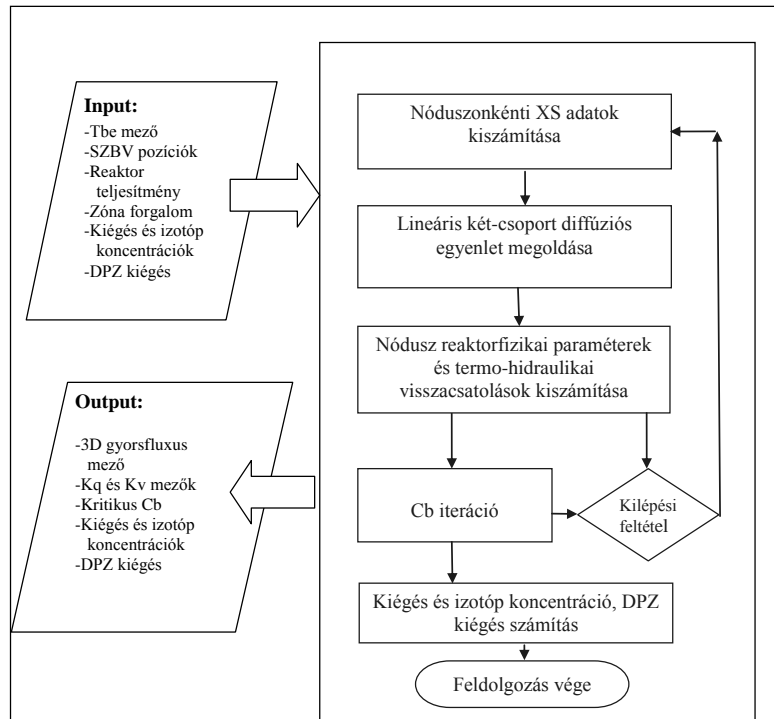
- 1.) A v6.10 verzióban alkalmazott 3D kéts csoport diffúziós algoritmust teljesen kicseréltük egy modernebb és pontosabb modellre.
- 2.) Lehetőséget teremtettünk rá, hogy az egyenközű axiális felbontás mellett a diffúziós egyenlet megoldása azonos kazettahosszal lehetséges legyen a korábbi, valamint az átmeneti és a jövőbeni töltetek esetében is.
- 3.) A modellben a nóduszon belüli radiális (x-y) fluxusfelbontás a számítási idő és a számítási pontosság igényének megfelelően változtatható.

A C-PORCA 7 modelljeiben alkalmazott neutronfizikai közelítések az alábbiak:

- Kéts csoport 3D diffúziós modell alkalmazása a teljes VVER-440 zónát nódusz szintű felbontásban leíró számítások során.
- 2D neutrontranszport-számítás alkalmazása a nóduszok homogenizált csoportállandóinak kiszámítása során.
- A zóna anyagi összetételének leírásánál kazettanóduszra homogenizált kéts csoport állandók alkalmazása. Egy nódusz egy kazetta azonos hosszúságú darabját jelenti.
- Átlagos nóduszparaméterek alkalmazása a csoportállandók meghatározása során. Az üzemanyag kiegészének követésére a C-PORCA programban a nódusz kiegész értékének, a Sm-149, a Pm-149, a Np-239, a Pu-239, 240 és a Pu-241 izotópoknak a követését végeztük el.

A zónaellenőrzés fontosabb mérőeszközei

Az on-line zónaellenőrzés a VVER-440-es blokkokon hőmérőkkel és SPN (Self Powered Neutron) detektorokkal történik. A hőmérsékletmérések közül a legfontosabbak a ki- és a belépő csomkokon elhelyezett úgynevezett hurokmérések, amelyek nagy pontossággal meghatározzák a reaktorba belépő és az onnan kilépő hőhordozó hőmérsékletét. A hurokmérések alapján a reaktor forgalom ismeretében meghatározható a reaktor teljesítménye. A hőmérők másik fontos csoportját a kazetták fölött elhelyezett, a kazettából kilépő hőhordozó hőmérsékletét mérő, kazetta kilépő hőmérsékletmérések alkotják. Ezeknek a méréseknek és a reaktor belépő hőmérsékletekből meghatározott kazetta belépő hőmérsékletnek az ismeretében meghatározható a hőhordozó felmelegedése az adott kazettában. Optimális esetben minden reaktorban a 349 kazetta közül 210 kazetta esetén tudjuk megmérni a hőhordozó felmelegedését. A mért kazettafelmelegedés ismeretében – ismert kazettaforgalom mellett – meghatározható a kazetták teljesítménye is. A hőmérsékletmérések – az adott kazetta anyagi összetételének ismeretében – közvetett módon alkalmasak a kazettában levő neutronfluxus meghatározására is. Erre a célra azonban a neutronfluxusra közvetlenül érzékeny SPN detektorok (orosz elnevezéssel DPZ) vannak beépítve a zónába. Az SPN detektorok 36 kazetta középpontjában elhelyezett mérőláncokban találhatóak, láncenként 7 detektorral és 1 háttér-detektorral. Az SPN detektorokkal (SPND) láthatóan a zóna 3D monitorozása valósítható meg. A reaktor állapotának ellenőrzésére szolgáló további hőmérséklet- és nyomásméréseket, – amelyek kiegészítő információkkal szolgálnak a zóna aktuális állapotáról, – jelen anyagban nem részletezzük. A továbbiakban elsősorban az alapvető hurok és kazetta kilépő hőmérséklet-, valamint az SPND-mérésekkel foglalkozunk.



3. ábra: A C-PORCA iterációs sémája

A ROnA programban alkalmazott GEPETTO kiterjesztés alapötlete

Az előzőekben bemutatott VERONA rendszerben alkalmazott neutronfizikai modellt és a VVER-440 reaktorokban elhelyezett in-core méréseket. A zónamonitorozás alapvető célja az e forrásokból származó információ szintetizálása és végeredményként a zóna állapotát jellemző reaktorfizikai paraméterek lehető legpontosabb meghatározása. A VERONA rendszerben ezt a feladatot a GEPETTO modell végzi.

A GEPETTO alap gondolatának bemutatásához induljunk ki a következő jól ismert statikus sajátérték egyenletből (1), amely az \mathbf{M} migrációs és \mathbf{F} fissziós operátor ismeretében egyértelműen meghatározza a reaktor állapotát:

$$(\mathbf{M} + \lambda \cdot \mathbf{F})\phi = 0 \quad (1)$$

Amennyiben az adott állapotban a reaktor kritikus, akkor a sajátérték egységnyi lesz. Jelöljük ezt a sajátértéket és a megfelelő sajátvektort a továbbiakban nulla indexszel (λ_0, ϕ_0) . A továbbiakban próbáljuk megadni a zóna pontosabb leírását az (1) egyenletben szereplő mátrixok kismértékű megváltoztatásával:

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{M} + \delta\mathbf{M} \quad \mathbf{F}_1 = \mathbf{F} + \delta\mathbf{F} \quad (2)$$

A reaktor legyen továbbra is kritikus, azaz csak olyan perturbációkat engedünk meg, ahol a sajátérték továbbra is egy marad, amely egy megszorító feltételt jelent a perturbációs mátrixokra:

$$(\mathbf{M}_1 + \lambda_0 \cdot \mathbf{F}_1)(\phi_0 + \delta\phi) = 0 \quad (3)$$

Amennyiben a (3) képletbe beírjuk a (2) képletben kifejezett perturbált mátrixokat, akkor a következőt kapjuk:

$$(\mathbf{M} + \lambda_0 \cdot \mathbf{F})\delta\phi = \rho \quad (4)$$

$$\rho = -(\delta\mathbf{M} + \lambda_0 \cdot \delta\mathbf{F})\phi_0 \quad (4a)$$

A (4)-ben levő mátrix szingularitása miatt csak olyan perturbációk engedhetők meg, ahol biztosított a következő úgynevezett Fredholm-feltétel teljesülése:

$$\langle \phi_0^{*T}, \rho \rangle = 0 \quad (4b)$$

ahol a ϕ_0^* oszlopvektor az (1) egyenlet adjungáltjának a megoldása.

A továbbiakban a ρ perturbáció meghatározásához a kazetta T_{ki} méréseket hívjuk segítségül. A végső ρ perturbáció a feltételezésünk szerint olyan, hogy a perturbált fluxussal kiszámított kazettánkénti hőhordozó entalpiaváltozás értékeknek (amelyeket a modellünk ad a perturbáció figyelembe vételével) négyzetesen legjobban kell illeszkedniük a mért értékekhez. Ez képletben megfogalmazva a következő függvény minimumát jelenti:

$$\mathfrak{S} = \sum_{i=1}^N (\mu_{mi} - \{\mathbf{S}(c \cdot \phi_0 + \delta\phi)\}_i)^2 \quad (5)$$

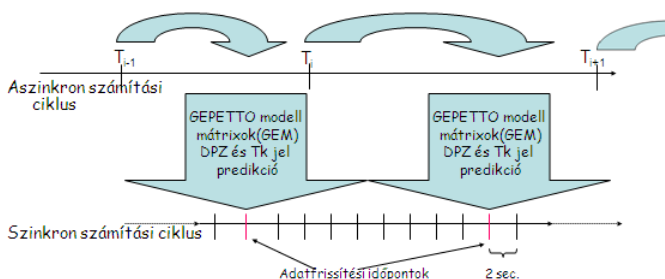
ahol az összegzést i szerint az összes mért pozícióra el kell végezni, az N pedig a T_{ki} mérések száma. A μ_{mi} jelenti a mért értékeket. Az S egy mátrix, amely megadja a fluxus ismeretében a mért érték predikcióját. A v6.20 verzióban az S mátrix tartalmazza a kazetta átlagos kilépő hőmérséklet és a termoelem jel közötti konverziót is [5]. A c normálási faktorra az (1) egyenlet homogenitása miatt van szükségünk.

A fent leírt perturbációs modell természetesen igényli a 3D C-PORCA futását, hiszen ott határozzuk meg az (1) egyenletben szereplő mátrixokat, amelyek az aktuális reaktorállapot függvényei. A modellek együttes működését a következő pont írja le.

A szinkron és aszinkron reaktorfizikai számítások kapcsolata

A VERONA v6.20 rendszerben a számítások ciklusideje két másodperc, amely jelenleg nem elegendő a zóna 3D modellezéséhez. Ahhoz, hogy a ciklusidőt tartani tudjuk, az on-line számításokat két részre bontottuk. A számítások egyik része előállítja a GEPETTO futásához szükséges mátrixokat, a másik pedig elvégzi a perturbációs számítást a pillanatnyi mérések felhasználásával.

A reaktorfizikai modellek folyamatsémája a következő: a ROnA program két példányban, szinkron és aszinkron módon fut. Mindkét futási módot a RPhDB adatbázistól kapja az inputot, és oda írja az outputot. Az aszinkron ROnA meghatározza a GEM COMMON mezőt is minden futási ciklusban. Ez a GEM adatmező képezi a GEPETTO kiterjesztés alapját a szinkron ROnA minden ciklusában mindaddig, amíg a következő aszinkron futás ezt nem frissíti. A folyamat vázlatát az 4. ábra mutatja.



4. ábra: A szinkron és aszinkron feldolgozás kapcsolata

A szinkron és aszinkron feldolgozás során a következő számításokat végezzük el a ROnA programban:

Az aszinkron feldolgozás során:

- A C-PORCA modell nódusz- és üzemenyagpálca-szintű, 3D zóna analízist végez a reaktorteljesítmény, a zónaforgalom, az SZBV pozíciók és a kazetta belépő hőmérsékletmező felhasználásával. A számítás bemenő adatai még a nódusz és pálcánkénti kiégés- és izotópkoncentráció eloszlások.
- A C-PORCA modell minden aszinkron ciklusban kiszámítja a nódusz, a pálcánkénti izotópkoncentrációk és a kiégések változását, és akkumulálja (integrálja) azokat.
- Minden aszinkron ciklusban a C-PORCA kiértékeli a DPZ és kazetta kilépő hőmérsékletértékeket, és predikciós együttható mátrixokat határoz meg a mérésekre.

- Az aszinkron ciklus során meghatározzuk a szinkron GEPETTO modell futásához szükséges mátrixelemeket. Az adatok a GEM adatmezőbe mentődnek a szinkron feldolgozás számára.

- Tesztelési célból az aszinkron ciklusban is futtatható a GEPETTO modell az in-core mérések figyelembe vételével. Erre vonatkozóan a validáció során mutatunk be eredményeket.

A szinkron feldolgozás során:

- 2 másodperces ciklusidővel a zóna- és hurok-mérlegegyenletek megoldása történik.

- 2 másodperces ciklusidővel a GEPETTO kiterjesztést végezzük el és meghatározzuk a perturbált 3D gyors fluxusmezőt. A modell a GEM mátrixok felhasználásával működik.

- Minden szinkron ciklusban az előkalkulált pálcánkénti teljesítményeloszlások és a kiterjesztett 3D gyors fluxusmező segítségével üzemenyag-pálca szintű zónaanalízist végez a modell, amely a lineáris és a pálcánkénti teljesítményező meghatározását jelenti.

- Minden szinkron ciklusban a szubcsatorna keveredést figyelembe vevő modell alapján a szubcsatorna kilépő hőmérsékletmező meghatározása történik meg.

A v6.20 verzióban az aszinkron ROnA feltételes indítással működik, ami azt jelenti, hogy nem rögzített frekvenciával indul el a kiértékelés, hanem csak akkor, ha bizonyos paraméterek változása az előző kiértékeléshez képes meghaladja a beállított korlátot, vagy stabil, illetve tranziens állapotban a vonatkozó idő eltelt. Az aszinkron számítás feltételes indítása ezért szükséges, mivel így biztosítható, hogy a számítás csak akkor fusson, amikor tényleg szükséges, de akkor biztosítsa a minél frissebb adatokat.

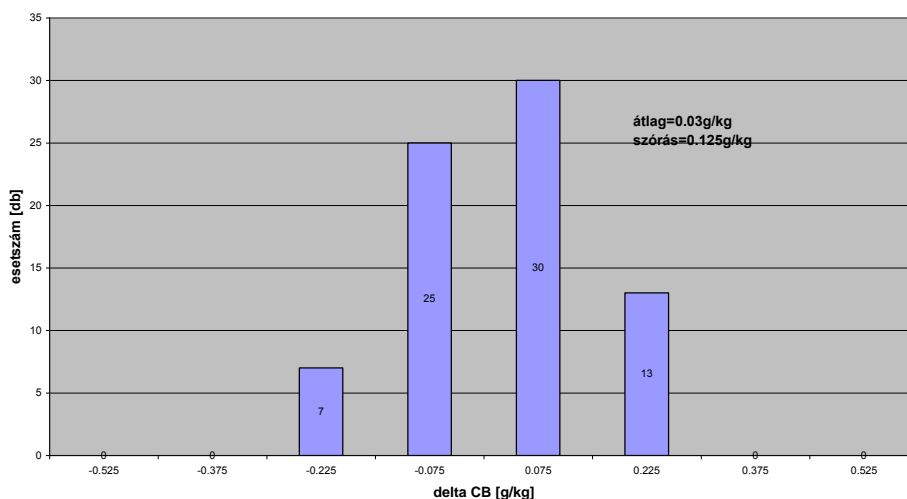
A fentiekből kitűnik továbbá, hogy a GEM-adaptációs eljárás lényege az, hogy összekapcsolja a gyors (2 másodperces ciklusidejű) szinkron GEPETTO kiterjesztést a kétszopt diffúziós számításokat végző, aszinkron C-PORCA számítás eredményeivel. A GEM-adaptáció a két modell közötti kommunikációt biztosító GEM COMMON adatmezőn keresztül valósul meg. Ebben található az az adat, amelyek a szinkron GEPETTO algoritmus számára biztosítják a nódusz szintű eloszlások meghatározását. Így a szinkron GEPETTO működéséhez nem kell előzetes szinkron C-PORCA futás. Emiatt a szinkron és az aszinkron számítás között csak akkor léphet fel jelentősebb eltérés, ha az aszinkron számítás eredménye időben elavul. Ez létrejöhet lassú változások (Xe koncentráció, kiégés), vagy gyors változások (rúdhelyzet, teljesítmény, belépő hőmérséklet, mérések hihetatlenné válása) révén.

A validáció legfontosabb eredményei

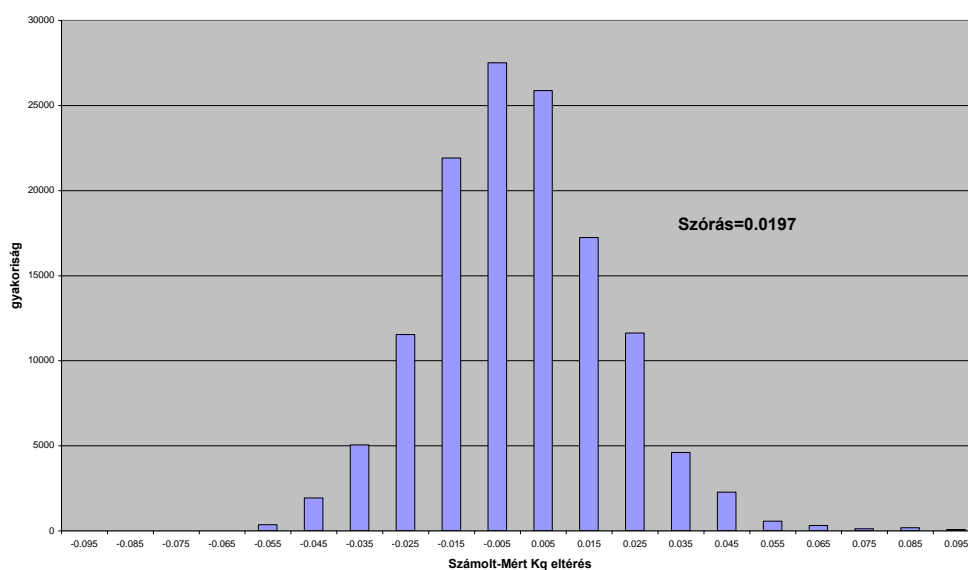
A VERONA rendszerben alkalmazott reaktorfizikai modellek hosszadalmas és kiterjedt tesztelési folyamaton estek át a tényleges on-line alkalmazásuk előtt. A tesztek az egyes alapmodellek ellenőrzésével kezdődtek, majd az integrált programok széleskörű off-line vizsgálati következtettek, végül a kész rendszer üzemi tesztjeivel fejeződtek be. A tesztelés eredményeinek teljes körű leírása természetesen meghaladja egy cikk terjedelmét, ezért itt csupán néhány fontosabb eredményt mutatunk be.

Elsősorban érdemes bemutatni, hogy az alap diffúziós C-PORCA modell eredményei hogyan viszonyulnak a mérési adatokhoz. Itt háromféle teszt eredményeit mutatjuk be: az elsőben megvizsgáltuk a számítás pontosságát a mért kritikus bórsav-koncentrációra vonatkozóan, amellyel a sajátérték számítási pontosságát teszteltük. A teszt eredményeit az 5. ábra mutatja. Az ábrán látható, hogy a mért-számolt értékek átlagos eltérése gyakorlatilag nulla, a szórásuk pedig $0,125[\text{g/kg}]$, amelyek nagyon jó értékek, ha figyelembe vesszük a mérés $\pm 0,1[\text{g/kg}]$ hibáját. A további ellenőrzések során a lokális fluxus- és teljesítményeloszlás eltéréseit vetettük össze az in-core mérésekkel. Ez utóbbi tesztek legfontosabb eredményeit a 6. és a 7. ábra mutatja. A 6. ábra szerint megállapíthatjuk, hogy a kazetta kilépő hőmérsékletméréseken alapuló, mért radiális teljesítményegyenlőtlenségek számításától való eltéréseinek a szórása $\sigma(\Delta Kq)=0,02$ nagyságrendű. Hasonlóan pontos értékek adódtak a 3D számolt-mért DPZ áramok eltéréseinek a szórása, $\sigma(\Delta i_{DPZ})=0,028$ is, amely a 7. ábrán látható.

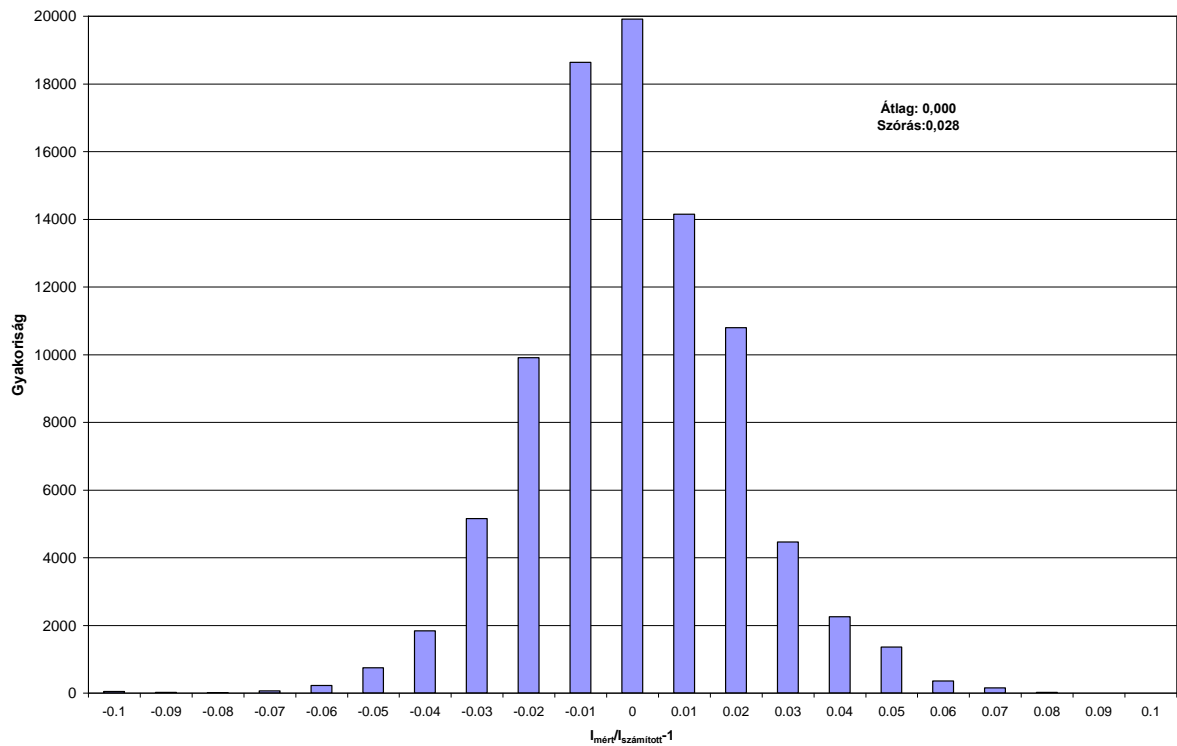
A VERONA aszinkron és a szinkron ROnA együttműködése szempontjából meg kellett vizsgálni, hogy a GEM mátrixelemek időnkénti frissítése mennyire befolyásolja a számított üzemviteli tartalékokat egy üzemi tranziens során. Ezzel a teszttel azt ellenőriztük, hogy mennyire helyes az a feltételezés, hogy a szinkron futás során használt modell-mátrixokat elegendő csak aszinkron futási ciklusonként frissíteni. A teszthez egy üzemi tranzienszt választottunk, amely során a reaktor teljesítménye 90-100 %, míg a 6. SZBV csoport helyzete 190-220 cm tartományban változott. A vizsgálat során futtattuk az üzemi helyzetnek megfelelő aszinkron-szinkron ROnA programokat, majd az aszinkron ROnA-t úgy, hogy minden két másodperces állapotot kiszámoltunk. Ez utóbbi számítás alkotta a referenciát, hiszen ekkor az aszinkron ROnA végrehajtotta a C-PORCA és a GEPETTO modellek együttes futtatását. Az elemzésnek a 8. és a 9. ábrán bemutatott eredménye bizonyítja a módszer helyességét.



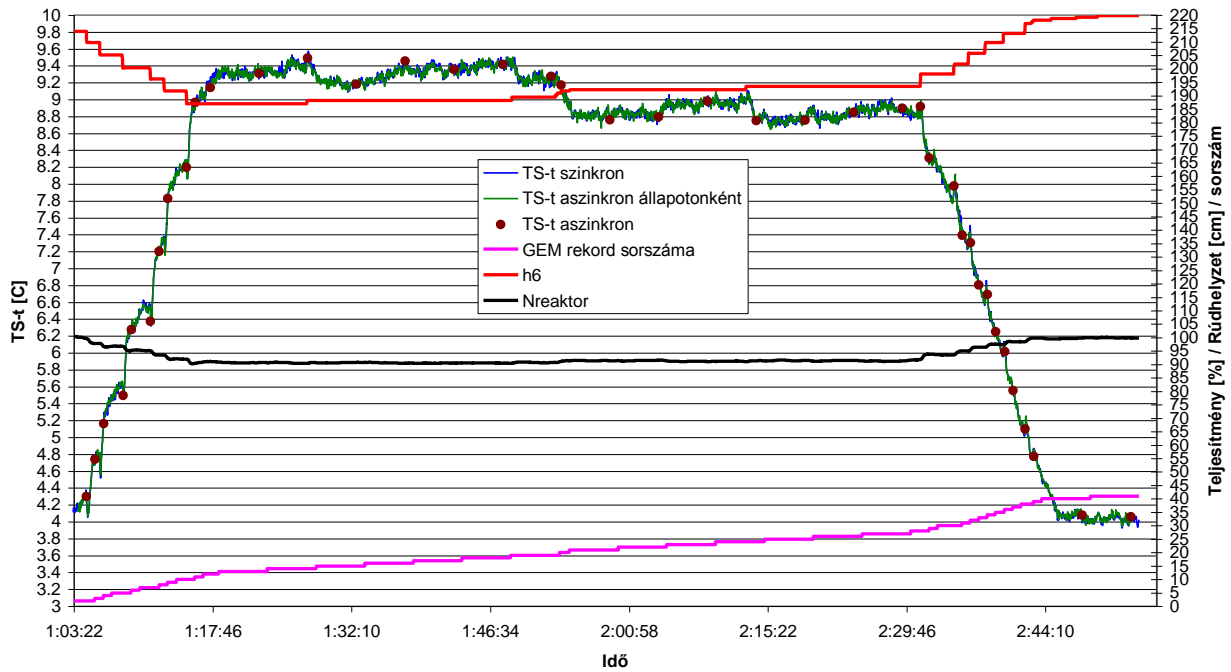
5. ábra: A mért és a számított kritikus Cb értékek eltéréseinek gyakorisága a PAE blokkjain nulla teljesítményes BOC állapotokban



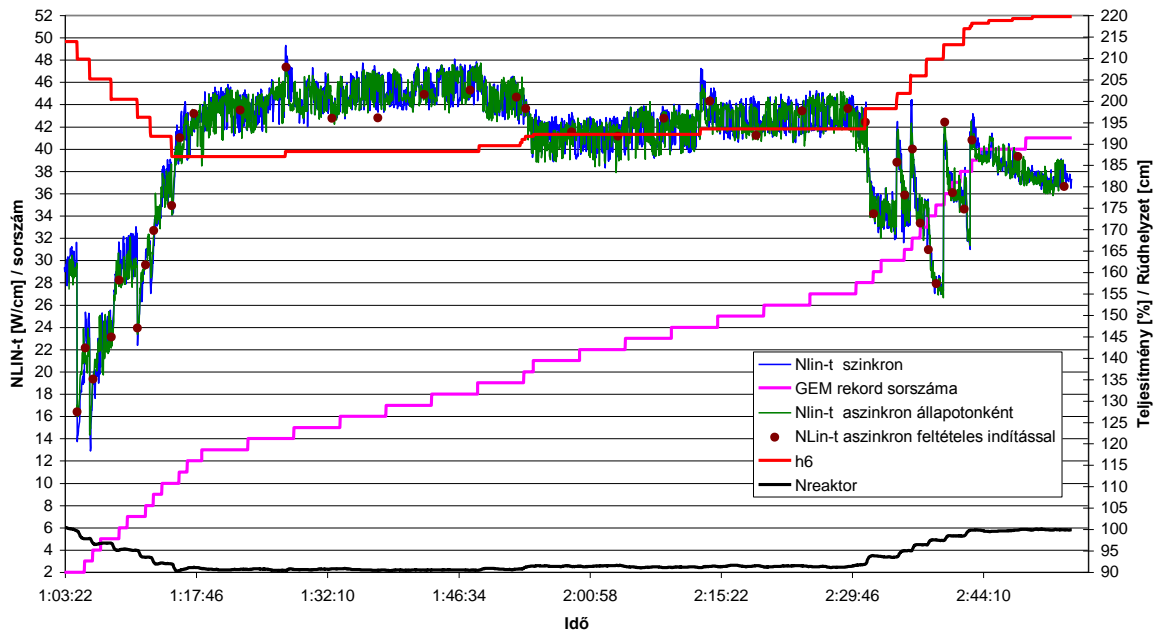
6. ábra: Számolt-Mért normált kazetta teljesítmények eltéréseinek gyakoriság eloszlása a PAE 1. blokk 25. és 26., a 3. blokk 23. és 24., valamint a 4. blokk 18., 19., 20., 21. és 22. kampányára



7. ábra: A mért és a számolt DPZ áramok arányának gyakoriság eloszlása



8. ábra: Szubcsatorna kilépő telítési tartalék minimumok változása az 1. blokk 26. kampány 2009. 02. 19-i (286,6 effektív nap) tranziense során
Áttekintő ábra



9. ábra: Lineáris teljesítmény tartalék minimumok változása az 1. blokk 26. kampány 2009. 02. 19-i (286,6 effektív nap) tranziense során
Áttekintő ábra

A VERONA-e szakértői rendszer célja és feladata

A VERONA rendszer kezdettől fogva több-kevesebb sikerrel próbál integrálni kétféle, egymástól eléggé különböző feladatot: az egyik az aktív zóna állapotának pontos és megbízható jelzése az üzemeltetési személyzet számára, a másik a zónaállapot reaktorfizikusi elemzésének támogatása. Az eddig megvalósult megoldások általános jellemzője volt, hogy míg az operatív személyzetet „információözön” árasztotta el, addig a reaktorfizikusi elemzések újabb és újabb segédprogramok fejlesztését kívánták meg, amelyek általában nem illeszkedtek az üzemi VERONA rendszerbe. A fenti kettőséget szünteti meg a VERONA-e (expert = szakértői) rendszer. Az alapkoncepció az, hogy ugyanazon zónaanalízis modellek segítségével biztosítsuk egyrészt az operatív személyzet részére a zóna ellenőrzéséhez szükséges információt, másrészt azt, hogy a jelen és a múlt összes információja rendelkezésre álljon a reaktorfizikai analízisek végzéséhez. A fenti célok első részét az üzemi VERONA rendszer, míg a második feladatot a VERONA-e látja el.

Maga a VERONA-e rendszer egy keretprogram (leegyszerűsítve egy menürendszer), mely magába integrál egy sor, különböző funkciót ellátó, a valós idejű és az archivált in-core mérési adatokat is elérő programot, amelyek egyik meghatározó eleme a ROnA program és annak a továbbfejlesztett környezete.

A VERONA-e programrendszer a következőkben felsorolt feladatokat képes ellátni:

- a kiválasztott blokk adatainak on-line megjelenítése;
- folyamatos adattáplálással végzett lokális zónaanalízis a kiválasztott blokkra (a szinkron és az aszinkron ROnA futtatása a lokális gépen);
- egy kiválasztott blokk futó kampányára vonatkozó lokális RAR archív képzése;
- a blokki RPH szervereken levő RAR szelektív mentése a kampány végén (ez az opció a régi HARACS fájlkon alapuló archívumot váltotta fel);
- izotermikus kalibráció végrehajtása;
- off-line számítások elkészítése a kampányok indításához;
- tranziensek tervezése, a tranziens lefolyásának előzetes vizsgálata;
- kampány jelentések készítésének támogatása;
- a kampány követéséhez használt C-PORCA input fájlkon generálása a RAR archívok alapján;
- jelminősítési és zónastatisztikai elemzések futtatása a kiválasztott blokk jeleire.

Irodalomjegyzék

- [1] J. Molnar: SCORPIO-VVER CORE MONITORING AND SURVEILLANCE SYSTEM FOR VVER-440 REACTORS 20. AER Symposium 2010
- [2] I. Pos: APPLICATION OF DISCONTINUITY FACTORS IN C-PORCA 7 CODE 20. AER Symposium 2010
- [3] Pócs István: NEUTRON DIFFÚZIÓS MODELL FEJLESZTÉSE A C-PORCA PROGRAMBAN Nukleáris Technikai Szimpózium 2007
- [4] RENDSZERTERV – II. kötet A REAKTORFIZIKAI FELDOLGOZÁSOK LEÍRÁSA V6.20 verzió 2008. szeptember 26.
- [5] Zs. Szécsényi: ASSEMBLY THERMOHYDRAULIC MODEL –ASHIMO- IMPROVEMENT FOR VERONA IN-CORE MONITORING SYSTEM AER Symposium 2009