

Atomerőmű lehűlési folyamatának szimulálása Matlabbal, remanens hő elvonása és energiakinyerés TEG-gel

Összefoglalás: Az elmúlt években bebizonyosodott, hogy nagyon nagy szükség van a magas biztonsági szintű rendszerekhez újabb biztonsági lépcsők beiktatására. Ilyen összetett rendszer az atomerőmű is. De mielőtt a biztonság növelését céloznánk meg, ismernünk kell azt a jelenséget, mely a nem várt esemény bekövetkezésekor a problémát okozza. Ehhez szükségünk van egy jól összeállított szimulációra. Az atomerőművek üzemmenetének jelentős kérdését képezi a láncreakció leállítását követő, szubkritikus reaktorállapot melletti, ún. remanens hőelvonás biztosítása. Ennek hiánya súlyos üzemzavarhoz is vezethet (Fukushima 2011). Ezen hőmennyiség elvezetéséhez szükséges villamos energiát normál esetben biztosítják az elsődleges (országos hálózat, házi üzemi rendszerek) és másodlagos (dízel generátor) energiaellátó rendszerek. Az üzembiztonság növelésének egyik fontos területe lehet a remanens hőelvonás harmadik, diverz módjának kialakítása. Megfigyelésünk és az abból keletkező megoldások a magyarországi paksi atomerőmű VVER 440-es reaktorblokkjai alapján született, de természetesen bármely hasonló működésű atomerőmű-típusra továbbvihető.

Kulcsszavak: Thermopile, TEG-modul, termoelektromos generátor, atomerőmű.

Abstract: In recent years, it has been proven that there is a great need to install new security steps in the event of additional, unexpected events in high-security systems. The nuclear power plant is such a complex system. But before we aim to increase security, we need to know the phenomenon that causes the problem when the unexpected event occurs. For this we need a well-constructed simulation. A significant issue in the operation of nuclear power plants is the so-called ensuring residual heat removal. The absence of this can also lead to serious malfunctions (Fukushima 2011). The electricity required to remove this amount of heat is normally provided by the primary

* Dunaiújvárosi Egyetem,
Szabadkai Műszaki Főiskola
E-mail: farkasi@uniduna.hu

** Dunaiújvárosi Egyetem, Szabadkai Műszaki Főiskola
E-mail: odry@appl-dsp.com

(national grid, domestic systems) and secondary (diesel generator) energy supply systems. One of the important areas of increasing operational safety can be the development of a third, diverse method of removing residual heat. Our observation and the resulting solutions were based on the VVER 440 reactor blocks of the Paks nuclear power plant in Hungary, but can of course be applied to any type of nuclear power plant with similar operation.

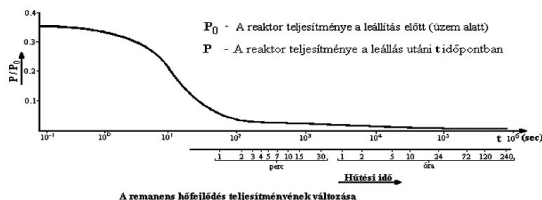
Keywords: Thermopile, TEG module, thermoelectric generator, Nuclear Power Plant.

I. Atomerőmű lehűtésének alapjai

A leállási borkoncentráció elérése után a blokkot le kell hűteni, majd az elért hőfokon kell tartani. A lehűtés során egyrészt a szerkezeti anyagokban tárolt hőt, másrészt az aktív zóna által termelt remanens hőt kell elvonni.

A művelet első szakaszában a térfogatkompenzátor lehűtésével be kell állítani a lehűtés üzemmódban előírt primerkör-térfogatkompenzátor között megengedett 60°C hőmérséklet-különbséget. Ez természetesen azt is jelenti, hogy egyúttal a primerköri nyomást is csökkentjük. A későbbiek során a primerkör lehűtése mellett is ezt a különbséget folyamatosan tartani kell.

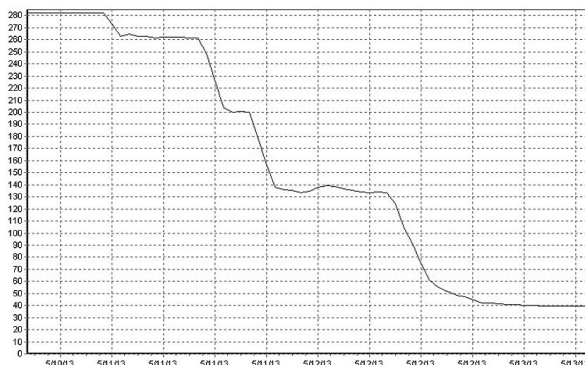
1. ábra. A remanens hőfejlődés teljesítményének változása



A primerköri nyomás folyamatos csökkentése miatt a hidroakkumulátorokat a $p_1 < 75$ bar elérésekor a primerkörrel le kell választani, sőt mivel közben a primerkört hűtjük is, nyomásukat is el kell engedni a nitrogén lefúvatásával (elkerülendő a ridegtörés esetleges veszélyét). Ha elérjük a primerköri nyomás csökkentése során a $p_1 \leq 20$ bart a térfogatkompenzátorban a gőzpárnát nitrogénre kell cserélni. A beadandó nitrogén mennyiségének minimalizálása miatt a térfogatkompenzátor a lehetséges maximum szintig ($L_{YP10} = 7.5 \pm 0.5m$) fel kell tölteni a nitrogén beadása előtt. A továbbiakban különösen szem előtt kell tartani a térfogatkompenzátor-szint pontos tartását, mert annak változása erősen befolyásolja a primerköri nyomást.

(A primerkör folyamatos lehűtése miatt az állandó szinttartás a térfogatkompenzátorban csak úgy lehetséges, ha a térfogatcsökkenést pótvízbeadással folyamatosan pótoljuk, eltérően a teljesítményüzemtől, amikor az átlaghőmérséklet függvényében a szintet engedjük változni, azaz a primerkörben állandó víztömeget tartunk.) A primerkör és a térfogatkompenzátor közötti $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ -t a $T_1 \leq 150^\circ\text{C}$ eléréséig tartani kell, majd ott $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ -ra kell csökkenteni.

2. ábra. A lehűtés diagramja egy normál lehűtés esetében



A kezdeti szakaszban, amíg a turbinák kondenzátoraiban a vákuum tartása biztosítható, a kondenzátorba redukálók benyitásával kell a lehűtést végezni. Mivel e művelet során elérjük a főgőzkollektor-törés-védelem működési értékét, a védelmet időben bénítani kell a BER-panel kulcsos kapcsolójával.

A szekunderkör normál technológiai kapcsolása mellett a primerkör lehűtése elkezdhető. A továbbiakban természetesen üzembe kell venni a technológiai kondenzátorokat és a lehűtő-redukálók segítségével be kell állítani a megengedett 30°C/h lehűtési sebességet. A lehűtési sebesség beállítása során figyelni kell arra, hogy a megengedettnél ne lépünk túl, ezért azt alulról kell megközelíteni. Nagy táptartály és primerköri hőmérséklet-különbségeknél a túllépés könnyen előfordulhat. A lehűtést gőz elvételével a frissgőz-kollektorból $T_1 = 140^\circ\text{C}$ -ig kell folytatni. A technológiai kondenzátorban lecsapódott kondenzátumot a szekunderköri táptartályba vezetjük vissza. A gőz-vizes lehűtés utolsó harmadában a táptartályok fűtését folyamatosan csökkenteni kell, hogy prime-szekunderkör közötti hőfoklépcső biztosítható legyen.

Még $T_1 > 190^\circ\text{C}$ felett, elkerülendő a túlzottan magas aktív zóna, a nyomáskülönbséget le kell állítani. A primerköri vezetékek egyenletes lehűtése miatt a leállított FKSZ-t el kell indítani ($T_1 = 175$ és 160°C -nál) miután leállítottunk egy üzemelőt.

$T_1 < 150^\circ\text{C}$ elérése után a lehűtés sebessége már erősen lecsökken, mert a beadott tápvíz és a primerkör közötti ΔT már igen alacsony. A stabil 150°C alatti érték elérése után a rendszert gőz–vizes lehűtésről víz–vizes lehűtésre kell átállítani. Ehhez a GF-eket, a frissgőzvezetéseket, a frissgőzkollektorokat, és a lehűtőrendszert teljesen fel kell tölteni tápvízzel. A töltés elkezdése előtt elkerülendő a szándékolatlan védelmi működéseket a BER-panelen bénítani kell a GF-védelmeket, hiszen az $LGF > L_{\text{Névleges}} + 600 \text{ mm}$ kizárja a feltöltési útvonalat. A feltöltés sebességét úgy kell beállítani, hogy a feltöltés ideje minimum 3.5 óra legyen. A lehűtésnek ebben a szakaszában kell ellenőrizni a Lépcsőzetes Indítási Programok áttérését is, a LIP II-programra. A programátállítás egyben azt is jelenti, hogy a ZÜHR-rendszerek egyes elemeire a továbbiakban már nincs szükség, sőt esetleges működésbe lépésük káros következményekkel is járhat, ezért ezeket ki kell szakaszolni.

3. ábra. Lehűtésdiagramok egy rektorblokkra nézve és annak trendje

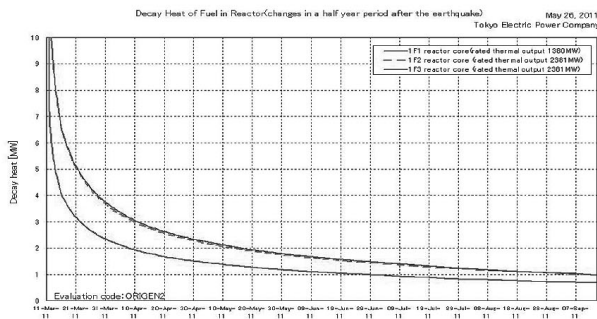


(Pl. nyomás alatt lévő, még zárt, de lehűtött reaktortartály esetén, ha a TH-s szivattyúk elindulnak, akár téves jelre is, pillanatok alatt túlléphetjük a ridegtörési hőmérséklethez tartozó engedélyezett nyomást, vagy elindul a sprinkler-rendszer téves jelre, hiszen ezen a primerköri hőmérsékleten már nem valószínű, hogy akár csőtörés esetén is a hermetikus tér nyomása elérje a határértéket.) Mivel a hőelvitel mennyisége a feltöltés alatt folyamatosan csökken, gondosan ügyelni kell arra, hogy ezalatt a primerkör ne melegedhessen vissza 150°C fölé.

A szekunder oldal feltöltése után a lehűtést tovább kell folytatni víz–vizes üzemmódban öt FKSZ üzemeltetésével $TI < 100^\circ\text{C}$ eléréséig. A szekunderoldali cirkulációt a lehűtő szivattyúk biztosítják. Ha a primerköri átlaghőmérséklet 100°C alatt van, a természetes cirkulációban majdan résztvevő két hurok kivételével az FKSZ-eket le kell állítani. Az üzemből kivett hurokokhoz tartozó gőzfejlesztőket szekunder oldalról nem kell kizárni, biztosítva az intenzívebb lehűlésüket.

Leválasztásuk TGF-fal $\leq 40^\circ\text{C}$ elérésekor, de legkésőbb a reaktor nyomásmentesítése előtt történik. Ha a térfogatkompenzátor és a beadott pótvíz hőmérséklete közötti $\Delta T < 80^\circ\text{C}$ a térfogatkompenzátor lehűtését a továbbiakban a pótvízszivattyúk felől kell végezni.

4. ábra. Remanens hő teljesítménye 6 hónapos időintervallumban a fukushimai erőműben



II. A lehűtés szimulációja

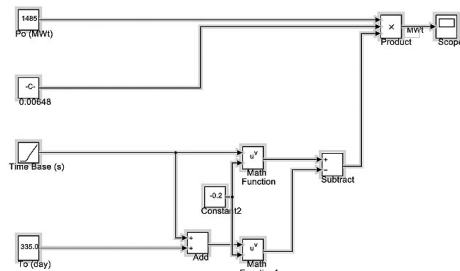
A feladat elemzéséhez első lépcsőben vizsgáljuk meg, mekkora ez az energia. A remanens hő (decay heat) becsléshez használt, numerikus módszert alkalmazó kódok (Melcor, Relap 1–2–3, Trac, Origen) 3–5% pontossággal képesek modellezni az állapotot.

REMANANS HŐ SZIMULÁCIÓJA

A Matlab R2013a szintén numerikus módszerével szimulálva (5. ábra), egy $T_0 = 335$ napig folyamatosan üzemelő, $P_0 = 1485$ MWt („Megawatt thermal”) hőenergiát termelő reaktor remanens hője a leállítást követő tíz napban (864000s) a 6. ábra szerinti. Látható, hogy ez az érték tíz nap elteltével is több, mint 3 MWt.

[1] Ragheb, M. (2011):
*Decay heat generation
in fission reactors.*

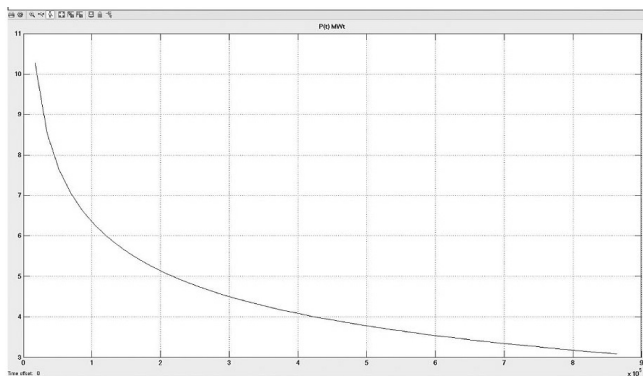
5. ábra. Remanens hő szimulációja



Az alkalmazott algoritmus [1]:

$$P(t) = 6.48 \times 10^{-3} P_0 [t^{-0.2} - (t+T_0)^{-0.2}] \text{ [MWt]} \quad (1)$$

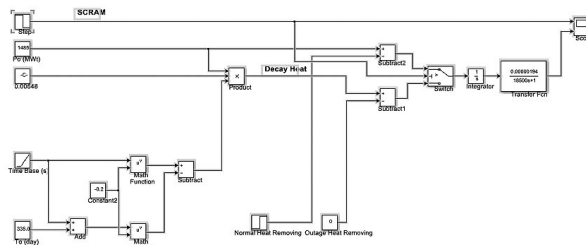
6. ábra. A szimulált remanens hő teljesítménye



A VÉSZLEÁLLÍTÓ ÉS A LEÁLLÁS UTÁN A RENDSZERBEN LÉVŐ
HŐMENNYISÉGGEL VALÓ KIEGÉSZÍTÉS

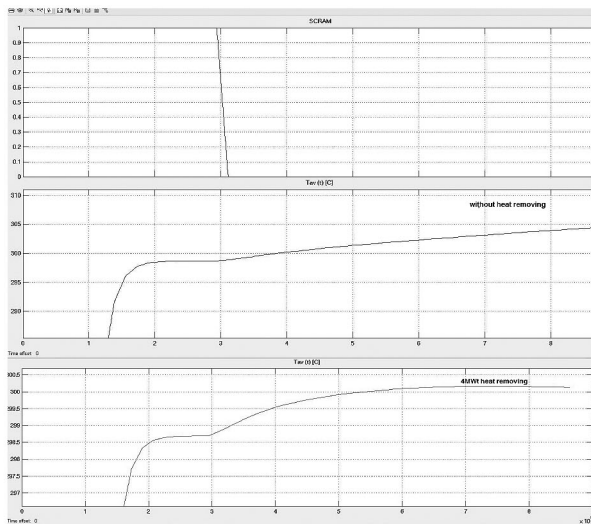
A továbbiakban a SCRAM-jellel (vészleállítás) leállított reaktor és a hozzá kapcsolódó fémszerkezetek együttes átviteli függvényét gerjesztettük az aktuális hőteljesítmény jellel (7. ábra).

7. ábra. A bővített modell



Az átviteli függvény arányos egytárolós tagként (PT_1), a víz- és fémtömegek eredőjeként került meghatározásra, figyelembe véve a reaktortartály, üzemanyag, fővízköri vezetékek, primerköri hőhordozó tömegeit és fajhő értékeit. Kényszerkeringetést, járulékos hőelvonást nem felhasználva az igen nagy hőtároló képességgel rendelkező tagunk kimeneti függvénye átlaghőmérsékletben skálázva tíz nap elteltével is monoton növekvő jelet mutat. Folyamatosan rendelkezésre álló (állandó) leállási hőelvonó rendszert, illetve megtáplálást feltételezve, mintegy 4MWt hőelvonás a fenti trendet a hetedik napon fordítja meg, 300°C hőmérsékletnél (8. ábra, harmadik diagram).

8. ábra.

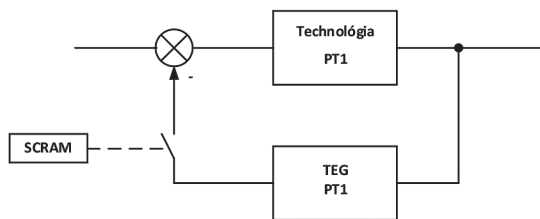


Meg kell jegyezni, kisebb érték is képes megfordítani a trendet, azaz lehűlést előidézni, mert a bomláshő-függvényünk is monoton csökken, a kérdés mikor, és meddig engedi felkúszni az átlaghőmérsékletet. Esetünkben – üzemelő rendszerek esetén – 305°C és 310°C értékeknél védelmi jelek képződnek, álló blokk esetén sem célszerű ennél nagyobb értéket megengedni. Kézenfekvő a kérdés, hogy a hatalmas, fém- és víztömegben eltárolt energiát közvetlenül hőelektromos átalakítóval (TEG) elektromos energiává alakítva, használjuk fel a remanens hőelvonás megtáplálására, mint „harmadik típusú”, diverzelve megtáplálást. Az egyébként hőszigeteléssel borított főberendezések TEG-gel történő befedése esetén a jellemző hőmérsékleteket figyelembe véve, valamint a helyiségek szellőzését (különösen a box) továbbra is feltételezve – erre a TEG hidegoldali hőelvonása miatt van szükség – mintegy 2.5–3.0 MW villamos energia állítható elő, a TEG-ek jelenlegi hatásfokával számolva.

TEG BEÁLLÍTÁSA, MINT REMANENS HŐELVONÓ BEÉPÍTÉSE

Az így létrehozott rendszer, termikus szempontból negatívan visszacsatolt rendszer, ami biztonsági garancia (9. ábra) a hőmegfutás elleni védelemre. A visszacsatoló ágba lévő termoelektromos generátor szintén PT1 tagként modellezhető, azonban időállandója jóval kisebb, mint az előreccsatoló hurok, a technológia időállandója.

9. ábra. A szimulálendő hőelvonó rendszer

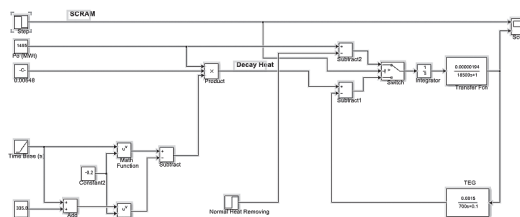


Az így elkészített Matlab-modell a 10. ábrán látható, míg a lehűtési görbéket a 11. ábra szemlélteti. Az a „minimum” függvény, ami a hőmérséklet növekedését nem engedi, 300°C fölé legalább

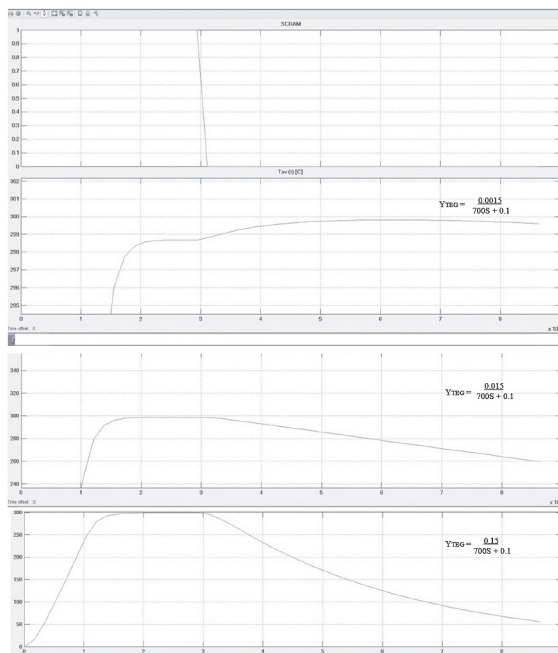
$$Y = \frac{0.0015}{700S + 0.1}$$

átviteli függvény kell, hogy legyen. Az időállandó növelése nem befolyásolja a görbe alakját, a TEG-ből kinyerhető villamos energia időbeni rendelkezésre állását határozza meg, míg az arányos átviteli összetevő a lehűtés meredekségére hat.

10. ábra. A szimuláció TEG-hőelvonó beépítésével

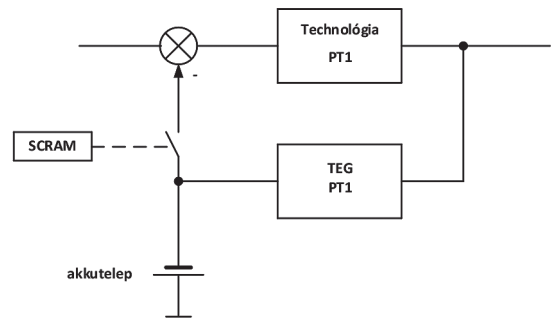


11. ábra. A szimuláció eredménye TEG-hőelvonó beépítésével



A tárolókapacitás növelése megoldható a TEG által előállított villamos energia akkumulátortelepben történő tárolásával (12. ábra).

12. ábra. Akkutelep beépítése a rendszerbe



A kampány során a megtermelt hő folyamatosan „ott van”, a SCRAM utáni időszakban egy ideig úgy-szintén, tárolt hő formájában, így a remanens hőelvonás kritikus 2–3 napjában a töltő- (kondicionáló) áram többszöröse kivethető az akkutelepből a keringetés fenntartásához. Valamennyi erőmű rendelkezik akku-mulátorral megtámasztott DC-sínnel (220V vagy 24V), így ennek kiépítése nem kerül többletköltségbe.

III. Atomerőmű vizsgálata a TEG felhasználási területének szemszögéből

A reaktorból kilépő forróvíz felhasználásával csak viszonylag alacsony nyomású (40–60bar) telített gőzt le-het előállítani, így a körfolyamat meglehetősen mérsékelt paraméterű. Ez az oka az atomerőművek relatíve alacsony hatásfokának ($\eta=30\text{--}40\%$). Az alábbi táblázat a fontosabb termikus reaktortípusok hőtechnikai jellemzőit tartalmazza:

1. táblázat. Termikus reaktortípusok hőtechnikai jellemzői

Reaktor	PWR	BWR	GGR	AGR	HTGR
Térfogati hőteljesítmény (W/cm ³)	70-110	40-50	3-5	5-10	10-20
Hatásfok (%)	30-40	30-40	30-40	40-45	40-45

PWR (Pressurized Water Reactor) Nyomottvízes reaktor, BWR (Boiling Water Reactor) Forralóvízes reaktor.
GGR (Gas cooled, Graphite moderated Reactor), Gázhűtésű, grafitmoderátoros reaktor.
AGR (Advanced Gas cooled Reactor), Továbbfejlesztett gázhűtésű reaktorok.
HTGR (High Temperature, Gas cooled Reactor), Magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktorok.

A nagy hőteljesítmény, alacsony hatásfok maga után vonja a nagy hőveszteséget. Ez a paraméter kínál lehetőséget a termopile-effektus alkalmazhatóságának vizsgálatára. A termopile cellák atomerőművi alkalmazhatóságának vizsgálata kiterjedhet:

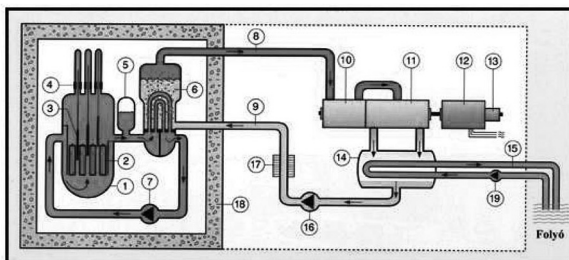
- az egyes erőműtípusok hőveszteségeinek részletes feltárására (tartályok, hőcserélők csővezetékek, forgógépek),
- a kinyerhető elektromos energia számítására, és az ezáltal elérhető hatásfok-növekedés megalapozására,
- az így nyert elektromos energia felhasználhatóságának elemzésére biztonsági rendszeri betáplálásként, növelve ezzel a biztonsági rendszerek rendelkezésre állását.

[2] Atomenergetika: Erőművek felépítése. <http://web.axelero.hu/csfolk/pdfprezentaciok/atomenergetika-kaeseromuvek.pdf>

NYOMOTTVIZES (PWR) ATOMERŐMŰ FELÉPÍTÉSE, MŰKÖDÉSI PARAMÉTEREI

Az aktív zónában felszabaduló hő elszállítását a gőzfejlesztőkhöz hat hurok végzi. A 13. ábra egy hurok jellemzőit szemlélteti.

13. ábra. Nyomottvizes (PWR) atomerőmű elvi elrendezése [2]

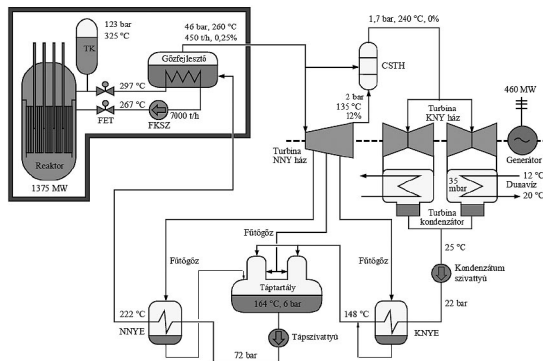


- | | | |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 Reaktortartály | 8 Frissgőz | 14 Kondenzátor |
| 2 Fűtőelemek | 9 Tápvíz | 15 Hűtővíz |
| 3 Szabályozórudak | 10 Nagynyomású turbina | 16 Tápvíz szivattyú |
| 4 Szabályozórúd hajtás | 11 Kisnyomású turbina | 17 Tápvíz előmelegítő |
| 5 Nyomástartó edény | 12 Generátor | 18 Betonvédelem |
| 6 Gőzfejlesztő | 13 Gerjesztőgép | 19 Hűtővíz szivattyú |
| 7 Primer köri keringtető szivattyú | | |

A fővízköri vezetékek Ø500x32 mm-es hőszigetelt saválló acélcsövek. Az egyik hurkon található a nyomástartás (125bar) érdekében kialakított térfogatkompenzátor. A fővízkör teljes térfogata 210m³, hurkonként 7000t/h áramlás-mennyiséggel, 267°C belépő, 297°C kilépő vízhőmérséklettel.

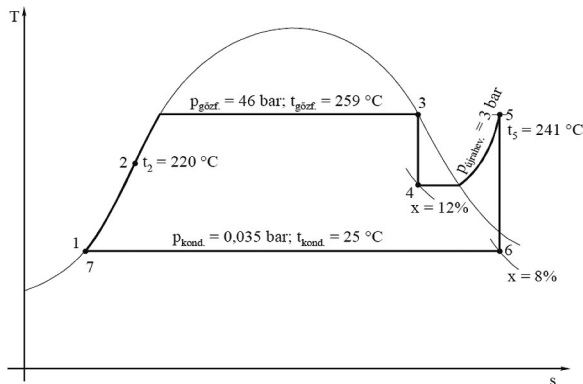
A boks (a fővízkört magába foglaló épületrész) hőmérséklete 40°C . A szekunder kör csőkapcsolása bonyolultabb: a gőzfejlesztők 260°C -os, 45 bar nyomású telített gőzt állítanak elő, 0,25% víztartalommal.

14. ábra. Főbb technológiai paraméterek egyszerű sémája



A gőzfejlesztőkből kilépő 490t/h tömegáramú gőz mozgási energiáját kihasználva forgatja a turbina tengelyét (3–3 gőzfejlesztő 1–1 turbinát). A víz–gőz körfolyamat T-s diagramját az alábbi ábra szemlélteti.

15. ábra. Rankine-körfolyamat



A korábban említett alacsony hatásfok:

$$\eta = \frac{P_{vill} - P_{önf}}{Q_r} = 34\%.$$

Q _r	reaktor hőteljesítmény	(1375MW)
P _{vill}	leadott villamos teljesítmény	(500MW)
P _{önf}	reaktorblokk önfogyasztása	(30MW)

Termoelektromos generátor (TEG) elhelyezhetőségét és alkalmazhatóságát célszerű tehát vizsgálni az elvesztett hőteljesítmény minél nagyobb hányadának visszanyerése érdekében. Számításba vehetők mindazon primer- és szekunderköri felületelemek, melyeken az említett hővesztesség (jelenleg szigeteléssel ellátott módon) fellép. A felhasználható (beépíthető) felületek TEG-célú felhasználása értelemszerűen nem ronthatja (nem befolyásolhatja) a rendszerelem eredeti paramétereit, annak funkcióbeli képességeit.

TELJESÍTMÉNYVISZONY-SZÜKSÉGLETEK VVER 440 REAKTORBLOKK NORMÁL LEÁLLÍTÁSA ESETÉN

Csak a mérőkörök és a jelfeldolgozók (információt nyújtó rendszerek) üzemzavari megtáplálása, 4–20mA-es köröket feltételezve, néhány 100W teljesítményigényt jelent. (Ez esetben a vezeték nélküli távadó technika, készenléti mérőrendszerként kiemelt szerepet kaphat, de teljesítményigénye nem jelent komoly többletet.)

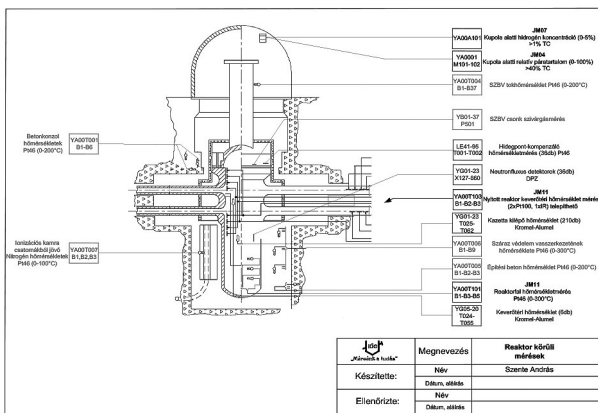
Normál vagy üzemzavari leállást, leállítást követő remanens hőelvonás (lehűtés) teljesítményigénye, a lehűtés 72–120 órás időtartama alatt, a főbb fogyasztókat figyelembe véve:

- 2db fő Keringető szivattyú 1600kW/szivattyú (6kV);
- 1db Tápszivattyú 2500kW (6kV);
- 1db Üzemzavari tápszivattyú 200kW (0.4kV).

A lehűtés utolsó fázisában már csak két darab lehűtő szivattyú üzemel (160kW/gép, 0.4kV feszültségről). Additíve hozzájön a fentiek (jellemzően relés) vezérlése, mérő- és szabályzó köreik. A leállítási pillanatában jelentkező maximális teljesítményigény megközelítően 6000kW (6MW), ami a 72–120 óra elteltével 300–400kW-ra csökken. Nem elhanyagolható, hogy a „nagy” szivattyúk 6kV 50Hz feszültségigényűek.

– 3db Nagynyomású zóna üzemzavari szivattyú 520kW/szivattyú, 6kV:

Reaktortartály felületi hőmérsékletét (pontosabban a reaktorfal fémhőmérsékletét) folyamatosan



TELJESÍTMÉNYVISZONYOK, -SZÜKSÉGLETEK VVER 440 REAKTORBLOKK
ÜZEMZAVARI LEÁLLÍTÁSA ESETÉN

A szabályzó és biztonságvédelmi rendszer tartozéka a 37db bóracél rúd, feladata a reaktivitás (reaktor-teljesítmény) gyors változtathatóságának biztosítása. A rendszer az operátori kézi parancsokat, a reaktor teljesítményszabályzó jeleit, illetve a reaktorvédelmi rendszer kimenőjeleit hajtja végre, a huzalozott prioritások betartásával. A 37db szabályzó rudat (bóracél rudat) 1–1 reluktancia motor (összesen 37db reluktancia motor) mozgatja. Egy motor teljesítményigénye motoros mozgatáskor 3900W. A teljesítményszabályzó, illetve üzemi sebességgel történő leterhelés 20mm/s névleges sebességgel történik, ezen motorok 1Hz-es betápláló frekvenciájának köszönhetően. Állandó teljesítmény tartáskor a motorokra DC feszültséget kapcsolunk („tartó üzemmód”) ilyenkor a teljesítményigény valamivel kevesebb.

Az üzemzavari leállítást a 37db hajtás egyidejű kikapcsolásával, a bóracél rudak aktív zónába történő beejtésével történik. Ennek sebessége 200mm/s, egy centrifugális fék, illetve egy fékezőcső-tüske által garantáltan. Az üzemzavari leállításnak teljesítményigénye nincs, azt a gravitáció biztosítja, teljesen biztonságos leállítási forma.

Fontos megjegyezni, az említett szabályzó és biztonságvédelmi rendszer egyenfeszültségű betápláló rendszere a rendelkezésre állás növelése céljából akkumulátoros sínről is megtámasztott (220V DC), a gyors reaktorleállításhoz semminemű betáplálásra nincs szükség.

A reaktorteljesítményt %-os skálán mérve exponenciális függvény, a %-os skálával tesszük számszakilag „emberi léptékűvé” a neutronfluxust (ami az egységnyi idő alatt, egységnyi felületen áthaladó neutronok száma). 100%-os teljesítményhez viszonyítva a szabályzó rudak alsó véghelyzetében a reaktorteljesítmény ezen skálán kisebb mint egy százalék, a turbinák forgatására (villamos energia előállítási célra) már nem alkalmas. Azt mondjuk, a reaktor állapota szubkritikus, azaz a neutron sokszorozási tényező <1 . (Egy darab neutron már nem hoz létre egy újabb neutron, a láncreakció leállt). Azonban a teljes neutronfluxus-tartomány 10–10%-tól 100%-ig értelmezett, energetikai célokra az 1–100% tartomány használható.

Az említett motorokkal történő reaktivitás (teljesítmény) változtatási lehetőség a gyors teljesítmény-változtatás eszköze (akár üzemi sebességgel, akár ejtéssel), amit szabályozási, gyorsleállítási célra használunk. A másik reaktivitás-változtatási lehetőség, amit az üzemanyag kiegészének kompenzálására használunk, a hűtővíz borkoncentrációjának változtatása. Ez egy nagyon lassú lehetőség, a kampány során fokozatosan – hogy a teljesítmény ne csökkenjen az üzemanyag kiegészével, folyamatosan), a fővíz körből elvett adott koncentrációjú bóros víz helyett tiszta kondenzvizet adunk be, így a bórsav-koncentráció folyamatosan csökken, a kampány végére (kb. 11 hónap alatt) 0 g/l lesz, mintegy 12g/l-ről indulva.

A motoros mozgatás teljesítményigénye a 37db motor vezérlésével együtt közel 400kW. (Ez a motoros mozgatás összes teljesítményigénye.)

A folyamatos, üzemközbeni bóros manipulációkhoz hat darab üzemelő fő keringető szivattyú, pótvíz-szivattyú és még néhány segédrendszer szükségesek, teljesítményigénye meghaladja a 10MW-ot. Azonban a leállási felbórozás két fő keringető szivattyúval történik, ehhez 4MW is elegendő.

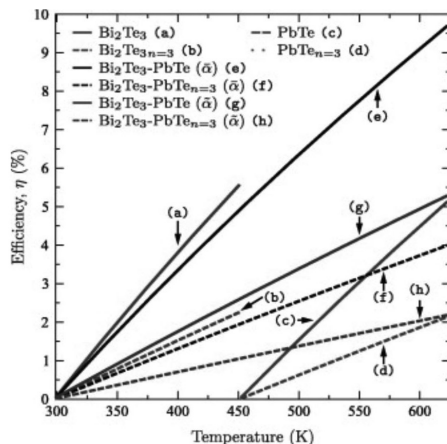
A fentiek alapján kiemelendő, hogy a reaktor leállítása (azaz a láncreakció leállítása) és a maradékhő-elvonás, két, egymástól elkülöníthető folyamat. Az első szakasz, a leállítási szakasz, a szubkritikus reaktorrállapot létrehozható energiaigény nélkül, mintegy 10s időtartam alatt (ennyi idő alatt esnek a zónába a szabályzó rudak). A leállítási folyamat második, a „remanens hőelvonás” szakasza, 70–120 óra, a $T_{\text{ATLAG}} < 60^{\circ}\text{C}$ eléréséhez szükséges. Megjegyzendő, hogy az első szakasz általában könnyen teljesül, és problémamentes. A második szakasz, a hőelvonás betáplenergia-igénye miatt okoz időnként nehézséget (Pl.: Fukushima, Diesel-generátorok hiánya), ami az aktív zóna károsodásához vezet.

IV. D. Megközelítő számítás a TEG segítségével kinyerhető teljesítményre

A lehetséges primerkörü felületek felmérése: hat fővízköri hurok esetében, azok TEG-gel befedhető hossza összesen 120 m, hideg és melegág esetében 10–10 m-el számolva. Értelemszerűen a kezelést, üzemeltetést szolgáló berendezések, csomópontok, szelepek, hőmérő zsákok helyeit nem érintheti a TEG-gel való lefedés. 560 mm átmérőjű fővízköri vezeték esetén csak a jelentősebb csőhálózaton 210m² felületű, 270°C átlagos hőmérsékletű felülethez jutunk. Ezt azt jelenti, hogy a hidegágakon 250°C, a melegágakon 280°C képes fűteni az ott elhelyezett TEG-et. Hat darab, fekvő elrendezésű, 10m hosszú, 4m átmérőjű gőzfejlesztővel számolva 754m², szintén 220°C felületi hőmérsékletű bevonható felületet kapunk. Jelentősebb felületű főberendezés még az egy darab térfogat-kiegyenlítő, ahol a bevonható felület 52m², viszont a felület hőmérséklete 280°C. A szekunderkörü technológia hasonló feltárása: a 135m hosszú, 465mm átmérőjű főgőzrendszeri vezeték 197m² felületű, 220°C hőmérsékletű területet jelentenek. A tápvízrendszer 180°C átlaghőmérsékletével számolva, 426mm átmérőn 120m hosszon 160m² hasznosítható felületet kapunk. A nagyobb szekunderkörü tartályok, kis- és nagynyomású előmelegítő sorok, táptartályok hasznosítható felületei, blokkra vonatkoztatva: 395m², 100°C átlaghőmérsékletű kisnyomású előmelegítő, 480m², 200°C átlaghőmérsékletű nagynyomású előmelegítő, két darab 105m², 150°C hőmérsékletű táptartály. A fentiek a fontosabb, segédrendszerek, kis felületek elhanyagolásával számított energiavisszanyerési lehetőségek. A helyiség-hőmérsékletek, „hideg oldali hőmérsékletek” 30°C–50°C közöttiek.

Thomson, Seebeck és Peltier kutatásai nyomán hőelemet régóta használunk mérés-technikai célokra. Azonban új anyagokkal való kísérletek a jelenség tápenergia-forrásként történő alkalmazását is lehetővé tették. Az ilyen, termoelektromos modulok (TEG-ek) egyik legjobb termoelektromos paraméterekkel rendelkező csoportja a bizmuttellturid (Bi₂TE₃) alapú pszeudobináris ötvözetek csoportja. Néhány fontosabb TEG-anyagpár hatásfokát mutatja hőmérséklet függvényében a 17. ábra.

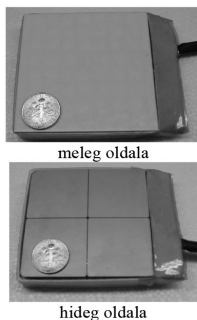
17. ábra. TEG-anyagpár hatásfoka



EGY ALKALMAZHATÓ HŐELEM ÉS A VELE KINYERHETŐ TELJESÍTMÉNY

Egyes területek – űrkutatás, járműipar, hadiipar – nagy várakozással tekint a hőelektromos modulok alkalmazása felé. Kézenfekvő, hogy az erőművi alkalmazást is átgondoljuk.

18. ábra. CMO-32-62S CASCADE TEG-modul



Hőforrás hőmérséklete:	500 °C
Meleg oldali hőmérséklete	480 °C
Hideg oldali hőmérséklet:	45 °C
Üresjárási feszültség:	19.45 V
Kapocsfeszültség:	9.75 V
Terhelőáram:	1.13 A
Kimeneti teljesítmény:	11.0 W
Felület:	0.004 m ²

A fent levezett, atomerőműre vonatkoztatott nagy hőmérsékletű felületek esetében visszanyerhető teljesítmény: a fővízköri vezetékeken 325kW, a gőzfejlesztőkön közel 1MW, a térfogat-kiegyenlítőn mintegy 82kW. A főgőz rendszeren 250kW, a tápvíz rendszeren 165kW, a kisnyomású előmelegítőkön 226kW, nagynyomású előmelegítőkön 550kW, táptartályokon 90kW teljesítményhez jutunk. Mindez a blokk egészére nézve 2,68MW, ami egy 500MW-os blokk esetében több mint fél százalék teljesítmény- és hatásfok-növekedést jelent. A fenti számítások a kiválasztott, nagy hőmérséklet-tartományú TEG-gel kerültek elvégzésre, amennyiben a hőszigetelő rétegek helyén ezek állnának. A bevitt hőenergia miatt az így nyert feszültség kvázi szünetmentesnek tekinthető, a modulok soros kapcsolásával tetszőleges érték nyerhető. Ez a teljesítmény nagy fogyasztók (szivattyúk, motorok) megápolásához nem elegendő, ennek a kis DC-szintnek az átalakítása is nehézkes, az irányítástechnikai fogyasztók tápellátásához viszont megfelelő. A mérőkörök jellemzően 24 V DC megápolással rendelkeznek, kis fogyasztásúak (0,5W/mérőkör).

A KINYERHETŐ TELJESÍTMÉNY FELHASZNÁLHATÓSÁGA

Egy atomerőművi blokk esetében mintegy ezer darab mérőkörrel – tartályszint, nyomás, hőmérséklet, dozimetriai és analitikai mérések – számolva, a TEG-gel előállított teljesítmény fedezi az igényeket. Emellett más információt feldolgozó, számítástechnikai rendszerek, processzor alapú rendszerek – reaktorvédelem, folyamatirányító berendezések – is végezhetik. A megtermelt energián túl, az ilyen alkalmazás biztonság-növelő hatása még inkább értékelhető. Célszerű létrehozni egy TEG-gel előállított biztonsági 24V DC-sínt, amely több üzemmódban üzemelhet. Állandó normál üzem mellett megápolhatja elsődleges betápláló rendszerként a felsorolt fogyasztókat. Feszültségkimaradással járó üzembiztonsági helyzetekben ez a sín tartalékáramforrásként viselkedhet, átkapcsoló automatika segítségével veszi át az elsődleges rendszer szerepét. De köztes megoldásként – elektronikusan a TEG-sínrendszerrel alkalmazható – szünetmentesíthető, megtámasztható alacsonyabb megbízhatóságú DC-betápláló rendszer. A megoldással az erőművi betápláló rendszerek – hacsak viszonylag kis teljesítményszint erejéig is – kapnak egy új „pillért”, mintegy harmadik típusú megoldást, a normál villamos háziüzemi rendszerek, valamint a Diesel-generátorok mellett.

Másik, nem elhanyagolható szempont – erőművek esetében – a TEG valamennyi moduljának számító-gépes kiértékelése egy komplett mérő- és diagnosztikai rendszert alkot. A befedett főberendezések – tartályok, hőcserélők, csővezetékek – 3D-s hőtérképét kapjuk, amennyiben azt megfelelő szoftverrel értékeljük ki. A TEG – gyors válaszidejű eszköz lévén – alkalmas csővezetékek áramló közegeinek mennyiségmérésére, analízisére. Mindez azonban elhanyagolható a tápfeszültségforrásként nyújtott biztonság-növelő hatása mellett.

Összegzés

Írásunkban igyekeztünk bemutatni, hogy a miként lehet szimulálni egy magára hagyott atomerőműben végbemenő folyamatokat. Amint látszik, ezt a Matlabbal tökéletesen meg lehet oldani. A szimuláció összeállítása során a remanens hőelvonás harmadik, diverz módjának elvi kialakítási lehetőségét is vázoltuk. A további vizsgálataink során nagyobb hangsúlyt igyekeztünk fektetni a szimulált rendszer pontosítására és annak fizikai megvalósításának lehetőségeire.

A tanulmányozás során az a következtetés vonható le, hogy van létjogosultsága a TEG használatának atomerőművekben. Lehet, hogy várni kell még pár évet ahhoz, hogy olyan paraméterű TEG-ek kerüljenek fejlesztésre, melyek segítségével nagyobb teljesítmény állítható elő (és ennek köszönhetően nagyobb teljesítményű motorok üzemeltethetők vele), de az itt felvázolt eredmények biztatónak mondhatók. Ha csak arra gondolunk, hogy az itt eredményként kapott 2,68 MW, egy kisebb település napi fogyasztását is fedezni tudja, vagy a már említett mérő és jelzőberendezések áramszükségletét tudja kielégíteni, már megéri foglalkozni vele. Mindenféleképpen érdemes továbbgondolni a kritikus leállás, vészhelyzetek bekövetkezésekor való használatát is.

