



Malé modulárne reaktory – budúcnosť stabilných dodávok elektriny aj v našom regióne?

Súčasná svetová jadrová energetika je založená na výstavbe a prevádzke veľkých jadrových reaktorov s výkonom od 700 MWe. Podľa rozdelenia Medzinárodnej agentúry pre atómovú energiu spadajú malé modulárne reaktory (MMR) do kategórie 10 až 300 MWe. Za posledných 10 rokov záujem o MMR vo svete výrazne narastá, pretože predstavujú významnú technickú inováciu nielen v jadrovej energetike a energetickej bezpečnosti, ale aj v koncepte nízkouhlíkového hospodárstva. Jadrová energetika budúcnosti sa bude musieť v oveľa väčšej miere prispôbiť dominancii obnoviteľných zdrojov energie a reagovať na potreby flexibilného riadenia elektrizačných sústav. Do popredia tiež vystúpi interakcia a previazanie MMR na ostatné priemyselné, výrobné a technologické procesy nízkouhlíkového hospodárstva.

Malé modulárne reaktory

MMR predstavujú najperspektívnejší koncept budúceho rozvoja jadrovej energetiky, pretože vo veľkej miere redukovávajú prekážky, ktorými je zaťažovaná výstavba a prevádzka veľkých jadrových blokov. Modularita je výhodou a znamená unifikovanú architektúru reaktora, ktorú možno ako celok priemyselne vyrobiť na jednom mieste, čo má výrazne priaznivý vplyv na čas výroby reaktora, prepravu a jeho osadenie v lokalite.

Všetky komponenty primárneho okruhu sú umiestnené v jednom module, ktorý možno transportovať po bežných komunikáciách. Ide o tzv. integrálne usporiadanie, keď sú všetky časti uložené v jednej nádobe a najdôležitejšiu

časť jadrového bloku tak možno vyrábať sériovo a štandardizovane. Cirkulácia chladiacej zmesi je tu zabezpečená iba na základe prirodzeného tepelného prúdenia [1].

V súčasnosti existuje niekoľko desiatok konceptov MMR, ktoré možno rozdeliť na dva základné typy. Prvý typ zodpovedá nízkoteplotným reaktorom tzv. III. generácie, druhý typ zodpovedá vysokoteplotným reaktorom tzv. IV. generácie. Vysokoteplotné reaktory majú všeobecne aj vyššiu energetickú účinnosť a predpoklad na výrobu vodíka [2].

Výhody malých modulárnych reaktorov

Medzi hlavné výhody patrí schopnosť uplatnenia sa aj v menších elektrických systémoch, ktoré nemajú kapacitu na začlenenie veľkých jadrových blokov a možnosť umiestnenia bližšie k ľudským aglomeráciám. Ich vyhotovenie výrazne znižuje ekonomické, sociálno-technické a environmentálne nároky na blízke okolie a interakciu s ním. Integrálne riešenie umožňuje zavedenie projektovej a finančnej flexibility do celého reťazca od výroby až po umiestnenie reaktora v danej lokalite.

Jednoduchá a súčasne odolná architektúra umožňuje vo vyššej miere využitie pasívnej ochrany voči eventuálnym nehodám a

znižuje zraniteľnosť voči prírodným katastrofám (zemetrasenia, tornáda a pod.). Pasívny systém chladienia MMR nie je závislý od dodávky elektrickej energie a v prípade nehody tak ostáva reaktor bezpečne odstavený. K priaznivým vlastnostiam patrí aj jednoduchší ekonomický model zaťažovaný výrazne nižším rizikom a neistotou z oddalovania dostavby reaktora, prekračovania predpokladaného rozpočtu alebo politickej stability v regióne.

Porovnanie konceptov MMR a klasických jadrových blokov z hľadiska bezpečnosti a integrálneho vyhotovenia

Porovnanie súčasných jadrových blokov a MMR je v tab. 1.





Transport nádoby MMR spoločnosti NuScale s elektrickým výkonom 45 MWe a tepelným výkonom 160 MWt [3]

Súčasný stav a perspektíva na regionálnej úrovni

V rámci európskeho regiónu majú aktívny program rozvoja a nasadenia MMR Rusko, Veľká Británia, Francúzsko a Taliansko. Na opačnom konci stojí Nemecko, ktoré plánuje odstaviť posledný jadrový reaktor do konca roku 2022 a posledný uhoľný blok do roku 2038. Potenciál nasadenia je tiež v krajinách, ktoré už majú vybudovanú jadrovú infraštruktúru či personálne kapacity a chystajú odstavenie elektrární na fosílnu palivá. Sem patrí Poľsko, Maďarsko, Česká republika a Slovensko [4].

Podľa expertov na jadrovú energetiku má v súčasnosti Rusko vedúce postavenie na poli rozvoja a inštalácie MMR a predpokladá sa, že v budúcnosti bude exportérom tejto technológie výroby elektriny a bude benefitovať z priemyselne vyrábanej modúlárnej technológie. V septembri 2019 Rusko pripojilo do elektrizačnej sústavy na Čukotke prvú plávajúcu jadrovú elektrárňu Akademik Lomonosov, ktorá obsahuje dva reaktorové bloky s elektrickým výkonom 2 x 35 MWe [6].

Výrazne aktívna na poli rozvoja a využívania MMR je aj Veľká Británia, ktorá vytvára podporné programy pre nízkoemisné zdroje energie. V roku 2015 bolo vyčlenených 250 miliónov libier na vývoj malých reaktorov a v roku 2016 30 miliónov libier pre inštitúciu, ktorá uvedie malý reaktor do prevádzky. Predpoklad uvedenia prvých reaktorov do prevádzky je medzi rokmi 2025 a 2030. Štúdiá Inštitútu energetických technológií z roku 2016 odporúča budovanie základne MMR ako kogeneračných zdrojov na kombinovanú výrobu elektriny a tepla. Odhadovaný potenciál do roku 2035 je 7 GWe. Rozvoj využitia jadrových reaktorov je pre Veľkú Britániu významný aj v kontexte námorníctva.

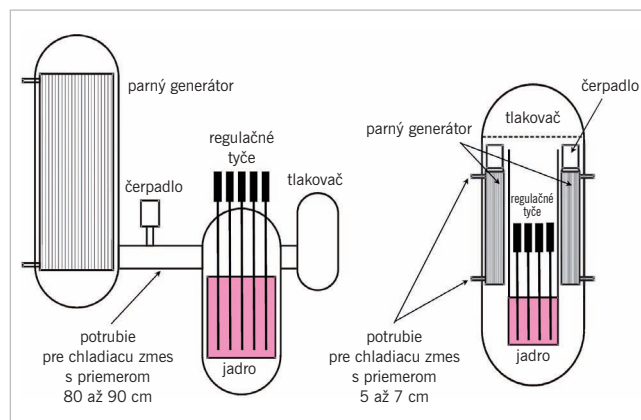
Produkcia elektrickej energie v Poľsku je založená najmä na fosílnych palivách. Podľa energetických plánov má Poľsko záujem vybudovať do roku 2040 šesť jadrových blokov s celkovou kapacitou od 6 000 do 9 600 MWe. Odstavovanie starnúcich uhoľných elektrární predstavuje trhový potenciál na nasadenie MMR. Dokument publikovaný Poľským národným centrom pre jadrový výskum vyvodzuje záver, že MMR sa môžu stať dôležitou časťou poľskej energetiky, avšak je nepravdepodobné, že pre jej budúcnosť budú kľúčové. V dlhodobom horizonte majú potenciál, avšak ich nasadenie pred rokom 2030 je nepravdepodobné. Rozvoj jadrovej energetiky v Poľsku je

však za posledné obdobie spomaľovaný chýbajúcou politickou vôľou a podporou v tejto oblasti výroby elektriny.

V maďarskom energetickom mixe dominuje jadrová elektrárň Paks so štyrmi jadrovými blokmi s celkovým výkonom 2 000 MWe, ktorá je schopná pokryť približne polovicu spotreby elektriny v krajine. Najväčšia uhoľná elektrárň Mátra má inštalovaný výkon 950 MWe a predpokladá sa jej úplne odstavenie do roku 2025. Ďalšia uhoľná elektrárň Bakony s inštalovaným výkonom 132 MWe bude odstavená do roku 2031, pričom v prevádzke ostane blok s výkonom 70 MWe. Elektrárň Vértés, ktorá je jedna z najstarších uhoľných elektrární, je už v súčasnosti odstavená. Maďarská vláda má všeobecný záujem o trvalý rozvoj svojej jadrovej energetiky [7].

Jadrová energetika Českej republiky je kľúčová v otázke energetickej bezpečnosti a má dlhú históriu. Približne 35 % elektriny v Českej republike sa vyrába v dvoch jadrových elektrárňach Dukovany a Temelín. Téma MMR je v Českej republike aktuálna od roku 2009, keď bola v odbornej verejnosti otvorená diskusia k ich potenciálu kombinovanej výroby elektriny a tepla pre priemysel a vykurovanie. Príkladom je mesto Jablonec nad Nisou, kde sa uvažovalo umiestnenie MMR s cieľom zníženia poplatkov za vykurovanie. Ministerstvo obchodu a priemyslu Českej republiky v rokoch 2012 – 2014 podporilo výskumný program zameraný na uskutočniteľnosť implementácie jadrových reaktorov malých výkonov. Jedným z cieľov programu bol výber vhodných konceptov MMR v podmienkach Českej republiky. Boli vybrané tri koncepty: prvé dva ľahkovodné reaktory NuScale s výkonom 45 MWe a mPower s výkonom 180 MWe vhodné aj na kogeneráciu, ako tretí koncept bol vybraný ruský reaktor SVBR-100 chladený tekutým kovom s výkonom 100 MWe. Okrem toho sa skúmala aj technológia, bezpečnosť, ekonomické parametre a kompatibilita s legislatívou a medzinárodnými odporúčaniami [8].

Perspektíva a implementácia MMR v rámci budúceho regionálneho energetického mixu bude korelovať s vývojom a nasadzovaním veľkých jadrových blokov a odstavovaním elektrární na fosílnu palivá. Budúcnosť leží v kombinácii a vzájomnej interakcii malých a veľkých



Porovnanie klasického (vľavo) a integrálneho vyhotovenia jadrového reaktora (vpravo) [5]

Klasický jadrový blok	Malý modúlárny reaktor
Vysokotlakové a nízkotlakové systémy	Pasívne chladenie jadra
Záložné dieselgenerátory	Architektúra dizajnu eliminuje potrebu záložného zdroja na chladenie jadra
Aktívny systém na odvod tepla z kontajneru	Pasívny odvod tepla z priestorov reaktora
Komplexné vyhotovenie dizajnu a jeho testovanie	Jednoduchšie a pasívne bezpečnostné systémy vedú k zníženiu počtu testov a dĺžky testovania
Udržiavanie núdzového systému napájajúcej vody, zásobníkov na kondenzát a chladiacej vody	Jadro reaktora má schopnosť odvodu tepla bez nutnosti použitia chladiacej vody
Riziko netesností v okruhoch	Integrálne riešenie výrazne eliminuje riziko netesností
Odvod tepla pomocou chladiacej vody do externých nádrží	Teplo sa z architektúry reaktora odvádza prúdením a vedením
Uzavretý systém chladiacej vody	Nie je potrebný systém chladiacej vody
Prevádzka bezpečnostných systémov vyžaduje podporné systémy odvodu tepla, chladenia a klimatizáciu	Koncept je navrhnutý tak, aby redukoval alebo eliminoval potrebu tepelného manažmentu

Tab. 1 Bezpečnostné porovnanie konceptu MMR a klasického jadrového bloku [4]

reaktorov najmä v krajinách, ktoré majú dostatočne rozvinutú jadrovú energetiku. MMR ostanú v úlohe doplnkových energetických zdrojov s požadovanou mierou flexibility a škálovateľnosti. Veľké jadrové bloky sa budú ďalej zameriavať na pokrytie základného zaťaženia elektrizačných sústav, pričom MMR budú poskytovať aj flexibilné riadenie svojho elektrického a tepelného výkonu. Kľúčovým faktorom bude nasadenie v teplárstve, kogenerácii a pri výrobe vodíka.

Súčasný stav a perspektíva na Slovensku

Slovenská republika má dlhú tradíciu a skúsenosti v prevádzke jadrových blokov. V súčasnosti je v prevádzke tretí a štvrtý blok jadrovej elektrárne Jaslovské Bohunice s celkovým inštalovaným výkonom 2 x 505 MWe. Od roku 2014 je elektrárňou v tzv. dlhodobej prevádzke. V roku 2020 bol výkon štvrtého bloku zvýšený na súčasnú hodnotu 505 MWe. Predpoklad odstavenia prevádzky je po roku 2045 [9].

Jadrová elektrárňou Mochovce prevádzkuje prvý a druhý blok s inštalovaným výkonom 2 x 501 MWe, ktorých odstávka je naplánovaná okolo roku 2060. Tretí blok Mochoviec je v súčasnosti dokončený na 100 % a jeho spustenie sa predpokladá v priebehu roku 2021. Štvrtý blok je dokončený na 88 % a jeho uvedenie do prevádzky sa očakáva po roku 2023. Inštalovaný výkon každého bloku je 471 MWe a spolu dokážu pokryť približne 26 % spotreby elektrickej energie. Odstavenie je naplánované po roku 2080.

Donedávna mala významné postavenie aj tepelná elektrárňou na hnedé uhlie Vojany, ktorá mala svojho času inštalovaný výkon až 1 320 MWe, a Nováky s inštalovaným výkonom 2 x 110 MWe, ktoré majú najmodernejšiu fluidnú technológiu spaľovania paliva a spĺňajú súčasné prísne emisné limity. Postupným odstavovaním tepelných blokov vo Vojanoch klesal aj ich výkon a od februára 2020 je prevádzka odstavená. Predpoklady odstavenia elektrárne Nováky sa mierne líšia, avšak dá sa očakávať v najbližších rokoch.

Z uvedeného vyplýva, že jadrová energetika bude mať po uvedení tretieho a štvrtého bloku Mochoviec do prevádzky dlhodobé dominantné postavenie vo výrobe elektriny a Slovensko sa stane exportérom tejto komodity. Nahradenie veľkých jadrových blokov systémom menších MMR je v uvedenom kontexte a časovom horizonte málo pravdepodobné. Podmienkou budúceho využívania MMR v slovenskej energetike bude musieť byť ich efektívne začlenenie do infraštruktúry tepelného hospodárstva. MMR s výkonom maximálne niekoľko desiatok MWe majú potenciál nahradiť súčasné teplárne a stať sa doplnkovým zdrojom stabilných dodávok energie na krajšej a eventuálne aj okresnej úrovni.

MMR s výkonom do 200 MWe možno inštalovať v areáloch bývalých tepelných elektrární, kde budú okrem výroby tepla poskytovať aj služby elektrizačnej prenosovej sústave. Súčasne sa tým vyrieši otázka, ako ďalej využívať priestorový potenciál týchto areálov a ich vyvedenie elektrického výkonu. Možnosti uplatnenia na poli poskytovania podporných služieb a výroby elektriny v podmienkach Slovenskej republiky sú nasledujúce:

- pokrývanie základného pásma zaťaženia sústavy – MMR budú dodávať do elektrickej siete konštantný elektrický výkon s výnimkou plánovaných odstávok,
- flexibilné pokrývanie periodických profilov spotreby (ang. load following) – MMR budú regulovať svoj činný výkon podľa vopred stanoveného denného diagramu zaťaženia,
- poskytovanie kladnej a zápornej sekundárnej regulácie výkonu (SRV±) – MMR budú okrem dodávky konštantného elektrického výkonu udržiavať výkonové pásmo na poskytovanie kladnej a zápornej sekundárnej regulácie výkonu v zmysle platných technických podmienok,
- poskytovanie zápornej sekundárnej regulácie výkonu v rámci virtuálneho bloku (SRV-) a zápornej terciárnej regulácie výkonu (TRV-) – MMR budú dodávať do elektrickej siete konštantný elektrický výkon a v prípade aktivácie zápornej regulácie dočasne znížia svoj vyrábaný výkon v zmysle platných technických podmienok.

Ďalšiu potenciálnu príležitosť nasadenia MMR v podmienkach Slovenskej republiky predstavuje vodíkové hospodárstvo. Najväčším spotrebiteľom vodíka v súčasnosti je chemický priemysel so spotrebou presahujúcou 100 000 ton ročne. Tento vodík sa vyrába pomocou fosílnych palív a ide o tzv. sivý vodík [10]. Spotreba vodíka stúpne do roku 2050 na hodnotu 400 000 až 1 400 000 ton ročne. Jeden MMR s výkonom 77 MWe/250 MWt dokáže vyrobiť viac ako 50 ton vodíka denne.

Expertný odhad pre európsky región predpokladá nasadenie prvých komerčných inštalácií MMR v korelácii s odstavovaním elektrární na fosílna palivá po roku 2030. Expertný odhad pre Slovenskú republiku predpokladá najoptimistickejší scenár nasadenia najskôr po roku 2040, v prípade nadväznosti na odstavovanie tretieho a štvrtého bloku Jaslovských Bohuníc v rokoch 2045 až 2050.

Podakovanie

Tento článok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt Medzinárodné centrum excelentnosti pre výskum inteligentných a bezpečných informačno-komunikačných technológií a systémov – II. etapa, kód ITMS: 313021W404, spolufinancovaného zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

[1] Perspektivy malých modulárnych reaktorů. [online]. Dostupné na: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/perspektivy-malych-modularnich-reaktoru>.

[2] Nuclear cogeneration: civil nuclear energy in a low-carbon future policy briefing. The Royal Society 2020. [online]. Dostupné na: <https://royalsociety.org>.

[3] NuSCALE SMALL MODULAR REACTOR ACHIEVES KEY MILESTONE. 2018. [online]. Dostupné na: <http://www.energyglobalnews.com/nuscale-small-modular-reactor-achieves-key-milestone/>.

[4] Morales Pedraza, J.: Small Modular Reactors for Electricity Generation. Cham: Springer International Publishing 2017. ISBN 978-3-319-52215-9.

[5] Small Modular Reactors. Elsevier 2016. ISBN 9780081002520.

[6] Ruská plávajúca jadrová elektrárňou zaznamenáva prvé úspechy. [online]. Slovak Nuclear Society 2020. Dostupné na: <https://www.nuclear.sk/ruska-plavajuca-jadrova-elektren-zaznamenava-prve-uspechy/>.

[7] Takacs, E.: The Small Modular Reactor types and their installation in the Hungarian electricity system. In: 2019 7th International YouthConference on Energy (IYCE). IEEE, 2019, s. 8 138 – 8 143. ISBN 978-1-7281-3923-4.

[8] Sklenka, L. – Losa, E.: Small and modular reactors and their potential use in the Czech Republic. In: Proceedings of the 2014 15th International ScientificConference on Electric PowerEngineering (EPE). IEEE, 2014, s. 687 – 691. ISBN 978-1-4799-3807-0.

[9] Elektrárne. Slovenské elektrárne, a. s. [online]. Dostupné na: <https://www.seas.sk>.

[10] Národná vodíková stratégia Pripravení na budúcnosť. [online]. Dostupné na: <https://www.slov-lex.sk/legislativne-procesy/SK/LP/2021/155>.

Ing. Jozef Novotný

Jozef.Novotny@sfera.sk

Ing. Rastislav Krbaťa, PhD., MBA

Rastislav.Krbata@sfera.sk

Ing. Jakub Slávik, MSc.

Jakub.Slavik@sfera.sk