

Pokročilé řízení jaderných elektráren s odběrem tepla pro systémy dálkového vytápění

Petr Neuman

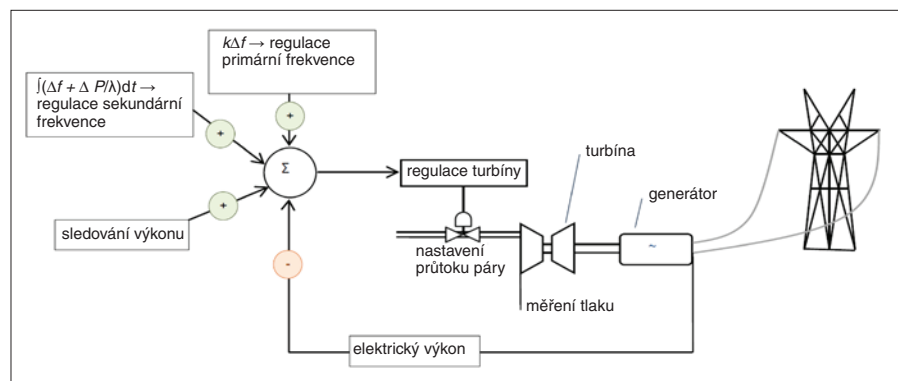
Tento příspěvek je zaměřen na pokročilé řízení jaderných elektráren s odběrem tepla pro systémy dálkového vytápění jako prvek zvyšující flexibilitu jaderných elektráren a také integrovaných přenosových elektrizačních soustav. Obecně je flexibilní provoz elektráren (fosilních – uhelných a plynových, vodních a přečerpávacích vodních, a jaderných elektráren) důležitým aspektem řízení energetických zdrojů a stability energetických systémů.

Úvodem krátká připomínka, jak to vloni bylo a s čím je nutné se nyní vyrovnávat. Evropský parlament hlasoval v roce 2020 pro zvýšení cíle EU v oblasti snižování emisí CO₂ do roku 2030 ze 40 na 60 %, což je více, než navrhovala Evropská komise, tedy 55 %. Podle schváleného programu Green Deal je cílem pro rok 2050 úplná „uhlíková neutralita“.

„Je to obrovský úspěch pro klima,“ řekl po hlasování nizozemský europoslanec Bas Eickhout, místopředseda parlamentního výboru pro životní prostředí, který vyzval k do-

[3], [4]), včetně toho, jaké jsou jejich pozitivní synergické efekty:

- eliminace emisí ze „špinavých“ uhelných elektráren a tepláren, a tedy významný přínos ke splnění cílů dekarbonizace v Evropské unii,
- implementace metody odvodu tepla zvýší tolik žádanou flexibilitu jaderného bloku, což pomůže regulovat nestálý a nepředvídatelný provoz obnovitelných zdrojů elektriny – větrných a fotovoltaických elektráren,



Obr. 1. Regulace turbíny v režimu regulace výkonu – provozní režim sledující zatížení (Load Follow)

sažení cíle snížení o 60 %. „Toto hlasování ukazuje, že Evropský parlament naslouchá vědě a hnutí Fridays for Future“.

Cíl 60 % prošel poměrem hlasů 352 ku 326.

Evropská lidová strana, nejmnocnější politický blok Evropy, jehož členkami jsou dosavadní německá kancléřka Angela Merkelová a předsedkyně Komise Ursula von der Leyenová, uvedla tehdy, že se zvýšeného cíle 60 % obává, pokud by žádná jiná velká ekonomika (USA, Čína, jihovýchodní Asie) nepodnikala rovnocenné kroky, což by mohlo mít za následek snížení evropské konkurenceschopnosti.

V současnosti nejsou jaderné elektrárny považovány za nejlepší řešení energetické budoucnosti, zejména v zemích Evropské unie.

V tomto článku jsou však uvedeny důvody, proč flexibilnější jaderné elektrárny mohou být energetickým prvkem zvyšujícím stabilitu a spolehlivost elektrizační soustavy (podrobněji je to popsáno v literatuře [2],

- zvýšení stability celého energetického systému instalací elektricky „tvrdých“ zdrojů energie (jako náhrada za masivně instalované obnovitelné zdroje a s tím spojený nedostatek „přirozené setrvačnosti“ rotujících hmot turbín a generátorů).

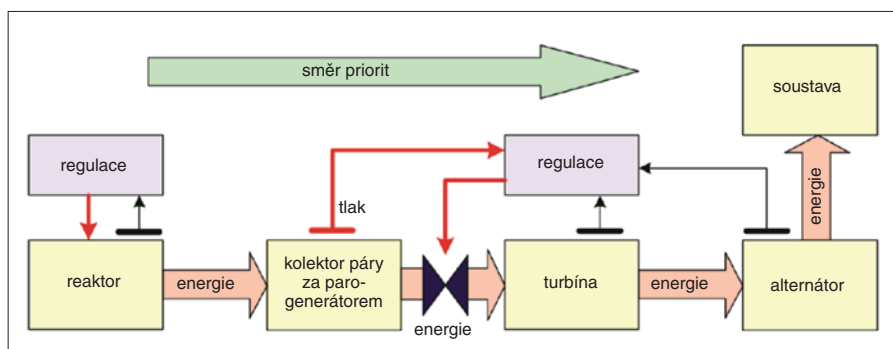
Důležité jsou také specifické podmínky

v České republice, které jsou popsány v tomto příspěvku. S využitím velkých jaderných elektráren je životaschopný způsob využití stávajících provozních systémů dálkového vytápění, do nichž bylo v minulých desítkách let investováno obrovské množství peněz, zejména v severní, střední a východní Evropě. V České republice je pro toto řešení technologická a technická situace mimořádně příznivá, daná zkušenostmi s výstavbou a dlouhodobým provozem, obsluhou, údržbou a postupnou modernizací JE Temelín. Zde je také dlouhodobá zkušenost s vytápěním blízkého města Týn nad Vltavou (7 km) a rovněž je budován horkovodní napáječ do krajského města České Budějovice se 100 tisíci obyvateli (25 km). V České republice probíhá příprava a brzy bude vypsáno výběrové řízení na nový jaderný blok Dukovany (JE Dukovany 5) typu PWR s omezením výkonu na maximálně 1 200 MWe, který má být uveden do provozu v letech 2036 až 2038. Proto je ještě čas zahrnout požadavky na odběr tepla pro dálkové vytápění do finální zadávací dokumentace (představitelé ČEZ avizují ještě provedení změn). Významnou roli v efektivním provozu jaderných elektráren hraje i aplikovaná úroveň automatizace a v současnosti také digitalizace [5].

1. Režimy práce a regulační programy jaderných elektráren s tlakovodními reaktory

Jako příklad konkrétního rozdělení režimů lze uvést JE Temelín, kde se provozní režimy bloku dělí na režimy:

- Normální – jsou to všechny plánované stavy a operace, které vyžaduje provoz bloku, při dodržení provozních limitů a podmínek bezpečného provozu. Jsou to např. stacionární provoz na výkonu, výkonové změny, spouštění a odstavení bloku, výměna paliva.



Obr. 2. Schéma prioritního řízení výkonu v jaderné elektrárně, typ 1 – prioritní je reaktor (regulace od reaktoru k turbíně – základní režim)

- Abnormální (poruchové) – neplánované stavy bloku spojené s odchylkou parametrů mimo hranice normálních provozních podmínek, ale o jejichž výskytu se v projektu uvažuje. Jsou to např. výpadky komponent primárního a sekundárního okruhu, popř. poruchové změny parametrů neaktivující přímo systém ochrany reaktoru nebo inicializaci bezpečnostních systémů. Blok je po odstranění příčin a následků schopen normálního provozu.
- Havarijní – stavy ohrožující bezpečnost provozu, překračující provozní limity a podmínky a představující riziko porušení integrity palivových článků. Pro řešení těchto stavů jsou vypracovány typové orientované předpisy určující postupy pro optimální obnovení bezpečného stavu.

Dalším z parametrů pro rozdělení provozních stavů je výkon. Podle výkonu se provozní stavy bloku dělí na:

- provoz na výkonu,
- provoz v nevykonovém stavu,
- provoz v horkém stavu,
- provoz v polohorkém stavu,
- provoz ve studeném stavu,
- provoz při odstávce.

Tento článek je zaměřen na provoz na výkonu, kdy řídicí systém musí zajistit požadovanou rovnováhu mezi výkonem generovaným reaktorem a výkonem odebraným sekundárním okruhem a předaným elektrizační soustavě.

Strategie řízení provozu bloku jaderné elektrárny při normálních provozních režimech určující závislost jeho hlavních parametrů na změně výkonu se nazývá regulační program.

2. Regulační program jaderných reaktorů PWR a dálkové vytápění

Celkovou účinnost přeměny energie určuje teplota nasycení páry T_{sat} vyrobené v parogenerátorech (vyšší hodnota této teploty vede k vyšší hodnotě účinnosti). Teplota a tlak chladicí kapaliny v sekundárním okruhu závisejí na tepelném výkonu dodávaném primárním okruhem a na výkonu turbogenerátoru daném spotřebou. Schéma na obr. 1 ukazuje, jak je regulován tepelný výkon spotřebovaný turbogenerátorem v závislosti na podmínkách sítě a požadavcích:

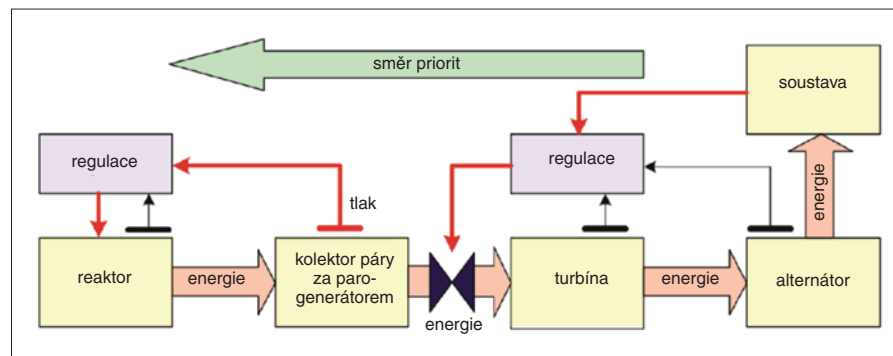
- regulace primární frekvence (*Primary Control*),
 - regulace sekundární frekvence (*Secondary Control*),
 - sledování zatížení (*Load Follow*),
 - ostrovní provoz, *Black Start*.
- Podpůrné služby se dělí na:
- služby výkonové rovnováhy, frekvenční,
 - ostatní podpůrné služby, nefrekvenční.

Množství elektrické energie generované v tlakovodních reaktorech závisí na teplotě a tlaku páry produkované v primárním okruhu, v parogenerátorech. Použití regulace ovlivňuje stav, tj. teplotu a tlak v sekundárním okruhu – obr. 1.

2.1 Regulační program s konstantní střední teplotou chladicí kapaliny v reaktoru

Regulační program s konstantní střední teplotou chladicí kapaliny v reaktoru je výhodný hlavně z pohledu primárního okruhu. Nevýhody tohoto programu jsou: poměrně velké změny teploty a tlaku páry v sekun-

gulace od turbíny k reaktoru. V obou případech musí být styčný bod, podle kterého se řídí vyváženost mezi výkonem vyrobeným v reaktoru a odebraným turbínou či turbínami a dále předaným prostřednictvím alternátoru elektrizační soustavě. Do celkové bilance je nutné zahrnout i vlastní spotřebu elektrárny a případné tepelné odběry.



Obr. 3. Schéma prioritního řízení výkonu v jaderné elektrárně, typ 2 – prioritní je turbína (ovládání od turbíny k reaktoru – režim sledování zatížení)

dárním okruhu (tlak s klesající zátěží vzrůstá), takže je nutné dimenzovat sekundární obvod na vyšší tlaky páry; nepříznivé podmínky pro řízení turbíny – při nižších výkonech turbíny je vstupní tlak páry vyšší, což je pravý opak toho, co vyžaduje turbína (s ohledem na účinnost).

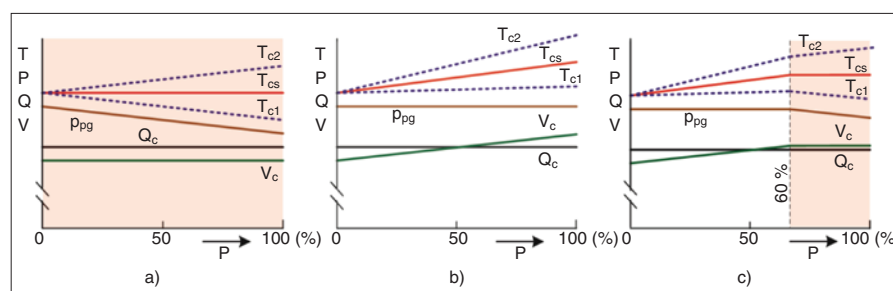
2.2 Regulační program s konstantním tlakem páry v kolektoru za parogenerátory

Regulační program s konstantním tlakem páry v kolektoru za parogenerátory, a tedy i konstantní teplotou sytosti je výhodný z hle-

U tlakovodních jaderných elektráren je tímto bodem tlak páry v kolektoru za generátory páry.

2.3 Regulační kompromisní program

Třetí řídicí program podle [1] je ve skutečnosti kompromisem dvou předchozích, kde se při vyšších výkonech (60 až 100 %) používá řídicí program s konstantní střední teplotou chladiva a při nižších úrovních výkonu (0 až 60 %) řídicí program na konstantní tlak páry v kolektoru za parogenerátory. Účelem je spojit výhody obou předchozích



Obr. 4. Změny parametrů jaderného bloku v závislosti na výkonu během jednotlivých řídicích programů: a) s konstantní střední teplotou, b) s konstantním tlakem, c) kompromisní

diska sekundárního okruhu. Výhody a nevýhody tohoto programu jsou přesně opačné než v předešlém případě. Konkrétněji, výhodou tohoto programu je zvýšení účinnosti tepelného cyklu a nižší požadavky na konstrukci parogenerátoru. Regulaci tlaku páry a tím i strukturu regulačního obvodu lze v tomto programu realizovat dvěma způsoby podle volby priorit v řízení, laicky řečeno zda je důležitější chod reaktoru, od něž se odvíjí výroba elektrické energie, nebo zda bude jaderná elektrárna řízena podle požadavků distribuční soustavy. Často se tyto dva přístupy nazývají regulace od reaktoru k turbíně a re-

programů z hlediska provozu jaderné elektrárny jako celku.

Při přepínání z jednoho programu do druhého se mění struktura řídicího obvodu. V režimu podle 2.1 přebírá regulaci regulátor výkonu reaktoru, na jehož vstup je přiváděna odchylka střední teploty chladicí kapaliny od její nastavené hodnoty. Střední teplota chladicí kapaliny se obvykle vyhodnocuje z rozdílu mezi hodnotami naměřenými termočlánky umístěnými v horké a studené větvi. Regulace tlaku na nižších úrovních výkonu je možná jak s regulátorem turbíny, tak s regulátorem reaktoru.

Průběh parametrů při změně výkonu je na obr. 4.

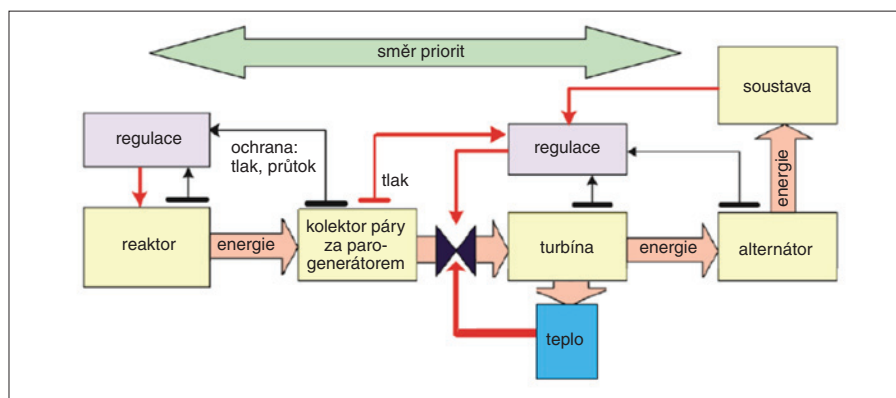
Následující schémata ukazují postup od dvou základních režimů (obr. 2, obr. 3) k navrhovanému režimu *Heat Follow* (obr. 5).

V českých jaderných elektrárnách s reaktory typu VVER 440 MW (JE Dukovany) se používá regulační program s konstantním tlakem páry, u reaktorů typu VVER 1000 MW (Temelín) byl použit regulační kompromisní program s udržováním konstantní střední teploty chladicí kapaliny při výkonech nad 70 % jmenovitého výkonu (tj. nad 700 MW). Do výkonu 700 MW je tedy regulace výhodná z pohledu sekundárního okruhu a zvyšuje se účinnost tepelného cyklu, při výkonu bloku nad 700 MW je to regulace výhodná zejména z pohledu primárního okruhu, přestože tam nastanou nepříznivé podmínky pro řízení turbíny s ohledem na její účinnost.

2.4 Kompromisní řídicí program - modifikovaný

Pro navrhovaný režim nezávislé regulace elektřiny a tepla prováděné změnou odběru tepla ze sekundárního okruhu by byl výhodný kompromisní program, resp. jeho modifikace. Je zřejmé, že v kompromisním programu byl zohledněn provoz na úrovni jmenovitého výkonu jednotky při základním zatížení, nikoliv s proměnným elektrickým výkonem závislým na spotřebě tepla pro dálkové vytápění. Bylo by tedy vhodné vytvořit třetí přístup pro topnou jednotku jaderné elektrárny se spotřebou tepla, tzv. režim *teplárenský - Heat Follow*.

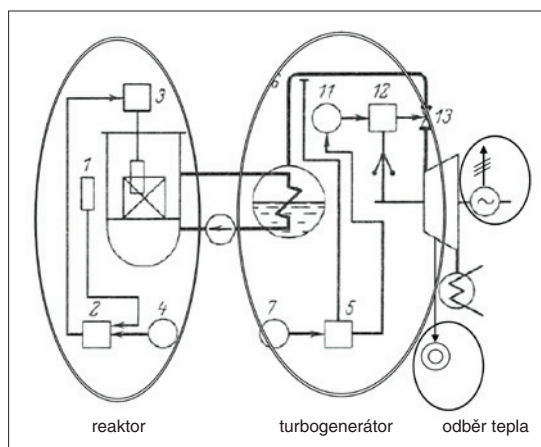
Tento třetí přístup k regulaci jaderné elektrárny s odběrem tepla se skládá ze základního režimu reaktoru a režimu „pseudoturbíny“, reaktor a turbína jsou nezávislé. Ideové schéma je na obr. 5.



Obr. 5. Schéma prioritního řízení výkonu v jaderné elektrárně, typ 3 - režim sledování tepla

Na obr. 6 jsou moduly, které musí být připojeny k řídicímu systému SKŘ, označeny elipsou. Vlevo je modul řízení výkonu reaktoru. Uprostřed je modul regulace hladiny páry v parogenerátoru, regulace tlaku a regulace turbogenerátoru pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny. Vpravo dole je modul systému dálkového vytápění a vpravo nahoře modul vyvedení elektrického výkonu do sítě.

Jaderná elektrárna s odběrem tepla je z hlediska teorie automatického řízení vícerozměrný nelineární dynamický systém, který je rozdělen na jednotlivé vzájemně propojené řízené subsystémy. Blokové schéma je na obr. 7.



Obr. 6. Základní režim (výkon reaktoru je pseudokonstantní stabilní, výkon bloku je regulován; jde o zjednodušený návrh regulačních smyček VVER 1000)

Podrobnější řešení struktury a algoritmu regulačních systémů a metody optimalizace budou popsány v některém z následujících článků.

3. Provozní režimy

3.1 Základní režim sledování zatížení

V režimu sledování zatížení (*Load Follow*) je změna výkonu reaktoru pomalá a v malém výkonovém rozsahu. Prioritou je přizpůsobení výroby elektrické energie síti, ke které je připojen generátor – vyrobená energie se vyvádí do elektrizační soustavy. Výkon je přizpůsobený zátěži z připojené sítě z hlediska frekvence a bilance výkonu.

Sekundární význam má malý odběr tepla z neregulovaného odběru, např. v JE Temelín do Týna nad Vltavou.

3.2 Režim sledování tepla

Režim sledování tepla (*Heat Follow*, *teplárenský režim*) má dvě varianty. V první je výkon reaktoru konstantní, přibližně 90 až 100 % jmenovitého výkonu, a turbína a reaktor jsou nezávislé. Prioritou je spotřeba tepla podle diagramu denního zatížení, sekundární význam má výroba elektřiny závislá na odběru tepla, která se mění „pomalu“ – přebytky lze ukládat do bateriových systémů.

Druhá varianta je režim sledování obnovitelných zdrojů – *Renewables Follow*. Výkonová konstanta reaktoru je zavedena, turbína a reaktor jsou nezávislé. Prioritou je kompenzace kolísavých změn ve výrobě elektřiny z obnovitel-

ných zdrojů, která se mění „rychle“. Sekundární je práce s akumulovanou energií, zvláště když je vyžadován rychlý nárůst dodávky elektrické energie. Bez ohledu na provoz je nutné energii ukládat do bateriových systémů nebo tepelných zásobníků horké vody, aby byly vždy nabitě minimálně na 60 % a tím připravené k řízené dodávce.

Navržený *teplárenský režim* je sumarizován v tab. 1. Rozsah výkonu bloku je 20 až 100 % jmenovitého výkonu. Provozní pásma pro regulační strukturu kompromisního režimu jsou 0 až 60 % (spuštění, vypnutí; provoz na minimální výkon) a 60 až 100 % (standardní provoz).

Co se týče *teplárny*, počítá se s tím, že v létě klesne spotřeba teplé vody nebo páry na 20 až 40 % zimní spotřeby. Režimy lze přepínat automaticky nebo dispečersky ve třech módech:

- podle topné sezony: léto (20 až 40 %), přechodné období (jaro, podzim: 70 %) a zima (100 %),
- podle dne v týdnu: pracovní dny, víkend,
- podle denní doby: den (80 až 100 %) a noc (40 až 60 %).

Řízení elektrického výkonu jaderného bloku realizované změnou spotřeby tepla z parní turbíny v sekundárním okruhu – tj. kondenzační režim s regulovaným odběrem páry – by umožnilo provozovat reaktor na úrovni statického výkonu, tj. bezpečně a stabilně.

Tab. 1. Provozní režimy sledování tepla a obnovitelných zdrojů

Teplota	do dálkového vytápění	režim sledování tepla I – pomalé změny
	do akumulátoru	režim sledování obnovitelných zdrojů – omezené, ale rychlé změny výkonu
Elektřina	do elektrizační soustavy	režim sledování obnovitelných zdrojů – standardní připojení, spotřeba tepla je nulová
	do bateriových systémů	režim sledování tepla I – pomalé změny

Současně by se zvětšil rozsah regulačního pásma a jaderné bloky by mohly být použity pro řízení výkonu a manévrovatelnost v mnohem větší míře než ve standardním kondenzačním režimu.

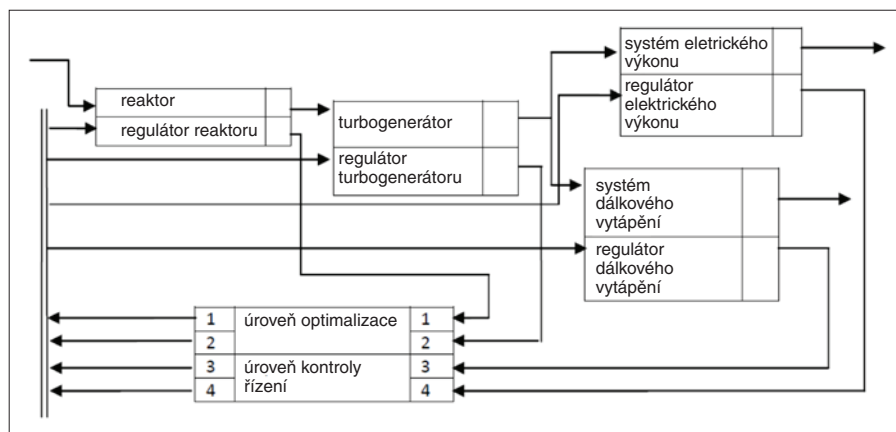
Další možností dosažení manévrovatelnosti je regulace tepelného výkonu reaktoru.

Touto cestou se v Evropě vydala především Francie a nejvýznamnější dodavatel jaderných energetických zařízení – státní společnost EDF. Její současné jaderné bloky typu EPR (EPR1650, EPR2, EPR1200) dosahují významné provozní manévrovatelnosti velké-

soustav, ale přinášejí také mnoho synergických efektů, zejména v oblasti systémů dálkového vytápění. Evropská unie by měla tyto skutečnosti více zohlednit a nezaměřovat se jen na řešení důsledků změny klimatu a dosažení uhlíkové neutrality co nejdříve (nyní do 2050).

Literatura:

- [1] NEUMAN, Petr. Regulace jaderných elektráren a odběru tepla pro dálkové vytápění. In: 10. ročník konference *Jaderné dny 2020*. Západočeská Univerzita v Plzni. Univerzitní



Obr. 7. Režim dálkového vytápění (Heat Follow), propojení vícerozměrných technologických a pseudoautonomně řízených subsystémů

ho výkonového rozsahu (20 až 100 % jmenovitého výkonu) a velkými rychlostmi změn (5 až 10 % jmenovitého výkonu za minutu), a to i v denním módu – viz [6], [7], [8]. Způsob provozu jaderných bloků JE Dukovany a JE Temelín v České republice je nevyužitou příležitostí k dalšímu zvýšení bezpečnosti a flexibility provozu a dynamické stability elektrické sítě, ale také k řešení teplotních bezemisním a uhlíkově neutrálním způsobem.

4. Pokročilé regulátory jaderných reaktorů s odběrem tepla pro dálkové vytápění

Cílem návrhu pokročilého řízení jaderných reaktorů s odběrem tepla pro dálkové vytápění je rychlé a beznárazové křížení mezi denními a týdenními úrovněmi výkonu a přechod mezi stabilními provozními úrovněmi výkonu v sezonním režimu (zima, přechodné období, léto). Řízení by mělo zajistit regulaci v režimech dálkového vytápění (režim sledování zatížení, režim sledování obnovitelných zdrojů), regulaci v případě pomalých a rychlých změn výkonu bloku, regulaci ve standardním režimu sledování zátěže a regulaci během odstavení reaktoru a jeho spouštění z nulového výkonu na nominální.

5. Závěr

Flexibilnější jaderné elektrárny nejen zvyšují stabilitu a spolehlivost energetických

kampus, Plzeň Bory [online]. [cit. 2021-10-21]. Dostupné z: https://www.jadernedny.cz/data/folders/Neuman_prezentace-f46.pdf

- [2] NEUMAN, Petr. Blahodárný vliv jaderných elektráren na provoz elektrizační soustavy (1. a 2. část). *Elektro*. Praha: FCC Public, 2018, (8-9, 10).
- [3] NEUMAN, Petr. Uplatnění jaderných elektráren v energetickém mixu – 1, 2, 3. *Energie 21*. 2018, (6 (prosinec)), 2019 (1 (únor), 2 (duben)).
- [4] NEUMAN, Petr. Synergické pozitivní efekty pro energetiku ČR získané propojením elektroenergetiky a zdrojů JE s teplotním. *Energetika*. 2019, (3, 4).
- [5] NEUMAN, Petr. Automatizace nevyčerpatelné a udržitelné energetiky. *Automa* [online]. 2017(11), 39–41 [cit. 2021-10-21]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/11150.pdf
- [6] NEUMAN, Petr. Francouzský jaderný blok EPR1200 pro Česko – předpoklady a přínos. *Atominfo.cz* [online]. 2018 [cit. 2021-10-21]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2021/06/francouzsky-jaderny-blok-epr1200-pro-cesko-pre/>
- [7] NEUMAN, Petr. Elektroenergetika ČR se bez nových flexibilních jaderných bloků neobejde. *Elektro*. Praha: FCC Public, 2021, (8-9).
- [8] NEUMAN, Petr. Francouzský jaderný blok EPR 1200 – jediná nabídka z EU na nový jaderný blok JEDU5. *Energetika*. 2021, (5).

Petr Neuman, NEUREG (neumanp@volny.cz)

JSP Industrial Controls

Kompaktní snímače teploty s výstupem 4 až 20 mA

Pevně nastavené nebo programovatelné v rozsahu -50 až +200 °C

Napájení z proudové smyčky, možnost kompaktního displeje

LED displej s volitelným převodníkem na lištu DIN, napájený z proud. smyčky

Služby vlastní akreditované kalibrační laboratoře pro měřidla teploty a tlaku

JSP, s.r.o.
 Raisova 547, 506 01 Jičín
 poptavky@jsp.cz | www.jsp.cz