

Recirkulace výkonu ve fúzních elektrárnách

Power Recirculation in Fusion Power Plants



Slavomír Entler

Ústav fyziky plazmatu
Akademie věd ČR



Michal Kolovratník

Ústav energetiky
Fakulty strojní ČVUT



Václav Dostál

Ústav energetiky
Fakulty strojní ČVUT

ABSTRAKT: Recirkulace vysokého energetického výkonu je jednou z fundamentálních vlastností budoucí fúzní energetiky. Vychází z nutnosti ohřívat termojaderné plazma na vysoké teploty a udržovat v něm elektrický proud. V článku jsou odvozeny analytické vztahy pro stanovení vlivu recirkulace výkonu na parametry fúzní elektrárny.

KLÍČOVÁ SLOVA: fúzní energetika, recirkulace výkonu, čistá účinnost

ABSTRACT: High energy power recirculation is one of the fundamental features of incoming fusion energy. It is caused by the necessity to heat the thermonuclear plasma at a high temperature and generate electric current in that. In the paper, analytical equations describing the influence of the power recirculation on the power plant parameters are derived.

KEYWORDS: fusion energy, power recirculation, net efficiency

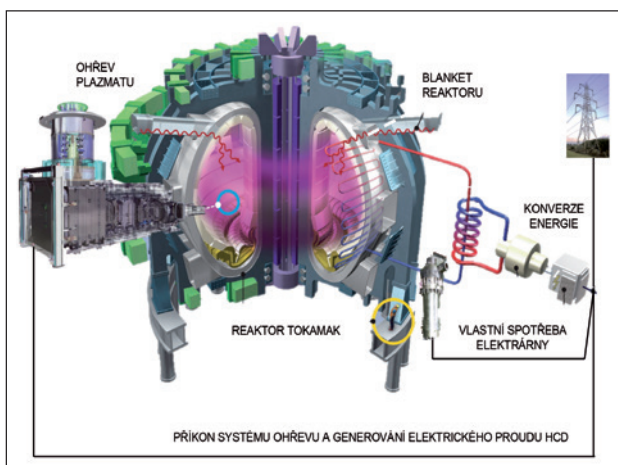
Jaderná fúze představuje energetický zdroj, který má potenciál stát se v budoucnu základem světové energetiky. Důvodem jsou nevyčerpatelné zásoby fúzního paliva, bezemisní a bezuhlíková průmyslová výroba elektřiny, inherentní bezpečnost fúzních reaktorů a konstantní vysoký energetický tok nezávislý na počasí. Vliv fúzních elektráren na životní prostředí bude srovnatelný s vlivem obnovitelných zdrojů energie [1]. Výzkum jaderné fúze se v posledním desetiletí rychle rozšiřuje z úzkého fyzikálního zaměření do řady inženýrských a technologických oblastí a byla zahájena příprava prvních fúzních elektráren. Podle plánu Evropské unie a dalších světových mocností by měla být první elektřina z jaderné fúze vyrobena do roku 2050 [2]. Základní podmínky energetického využití jaderné fúze zformuloval v roce 1955 britský inženýr J. D. Lawson [3]. Lawsonovo kritérium říká, že fúzní palivo v reaktoru musí na dostatečně dlouhou dobu dosáhnout takové hustoty a teploty, aby četnost fúzních jaderných reakcí zajistila celkový energetický zisk reaktoru. Potřebná teplota je na úrovni stovek milionů stupňů Celsia. Při této teplotě bude fúzní palivo ve formě plně ionizovaného plazmatu. Aby nedošlo k destrukci reaktoru, musí být zamezen kontakt horkého plazmatu s konstrukcí reaktoru. To je možné provést více způsoby, avšak jako nejnadějnější se ukázalo spoutání plazmatu

magnetickým polem. Proto jsou první energetické fúzní reaktory vyvíjeny na bázi magnetického udržení plazmatu.

Nutnost ohřát fúzní palivo na vysoké teploty přinese do energetiky nový technologický rys – recirkulaci vysokého elektrického výkonu [4–6]. Část vyrobené elektřiny bude vracena zpět do zdroje energie a následně opět využita k výrobě elektřiny [7] (**obr. 1**). Pokročilejší fúzní reaktory budou pracovat v režimu tzv. zapálení, ve kterém se plazma ohřívá autonomně termalizací a částic vznikajících při fúzní reakci [8]. To se projeví v postupném snížení recirkulujícího výkonu. I poté ale recirkulace výkonu zůstane součástí výkonové bilance elektrárny, pokud bude zajišťovat neinduktivní generování elektrického proudu nezbytného pro magnetické udržení plazmatu [9].

Recirkulace výkonu

K recirkulaci výkonu při krytí vlastní spotřeby dochází v menší či větší míře ve většině energetických oběhů, například část příkonu čerpadel nebo kompresorů přechází do pracovního média. Fúzní elektrárny budou charakteristické tím, že recirkulovaný výkon bude tvořit jeden z hlavních výkonových toků. Fúzní palivo ve formě plazmatu je nutné ohřát a udržovat na velmi vysokých teplotách nutných pro průběh fúzní reakce.



Obr. 1: Schematické znázornění fúzní elektrárny [10]

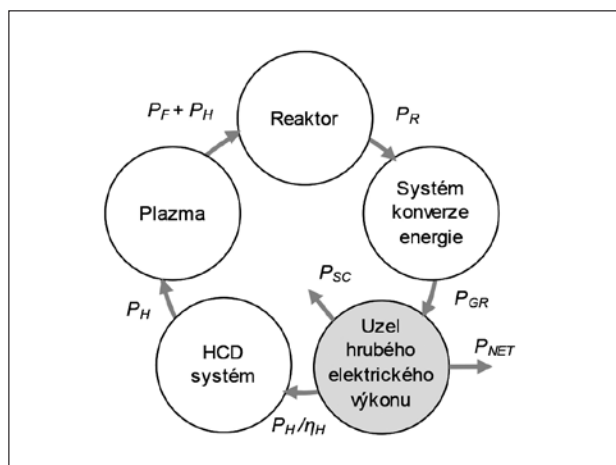
V reaktorech typu tokamak je také nutné v plazmatu generovat elektrický proud. Tyto funkce bude zajišťovat sofistikovaný systém ohřevu a generování elektrického proudu v plazmatu, označovaný jako systém HCD (Heating and Current Drive), který kombinuje tři fyzikální mechanismy: ohmický ohřev elektrickým proudem, vstřikování svazků urychlených neutrálních atomů a absorpci elektromagnetických vln [9]. Při provozu elektrárny bude systém HCD napájen vyráběnou elektrickou energií a bude ohřívat plazma. Teplo vložené při ohřevu do plazmatu bude z plazmatu zpětně vyzařeno spolu s energií uvolněnou při jaderné fúzi a stane se součástí tepelného výkonu reaktoru. Tepelný výkon reaktoru bude zařízením elektrárny transformován na elektrickou energii, která bude z části znovu použita pro napájení systému HCD. Základní schéma recirkulace výkonu je ukázáno na **obr. 2**.

V případě elektrárny s pulsním fúzním reaktorem [9] bude do schématu elektrárny včleněn zásobník energie ESS (Energy Storage System) vyrovnávající prodlevy energetického provozu reaktoru, aby byl zajištěn konstantní tok páry na turbínu. Současně musí být kompenzována pulsní spotřeba systému HCD zásobníkem elektrické energie, který zabrání kolísání výstupního výkonu elektrárny P_{NET} . Schéma elektrárny s pulsním fúzním reaktorem je zobrazeno na **obr. 3**. P_R^B označuje vyvážený tepelný výkon reaktoru a P_H^B vyvážený příkon systému HCD.

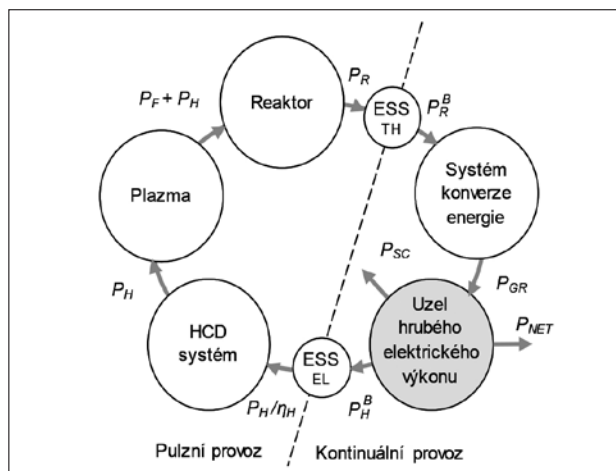
Důležitou charakteristikou fúzního reaktoru je faktor zesílení Q definovaný jako poměr fúzního výkonu a výkonu vnějšího ohřevu plazmatu:

$$Q = \frac{P_F}{P_H} \quad (1)$$

V energetických fúzních reaktorech první generace bude v blanketu reaktoru probíhat výroba tritia při exotermické reakci lithia s fúzními neutrony [9]. Vedlejším produktem této reakce je další energie, která bude zvyšovat tepelný výkon reaktoru. Faktor multiplikace



Obr. 2: Schéma recirkulace výkonu fúzní elektrárny s kontinuálně pracujícím reaktorem. HCD označuje systém ohřevu a generování elektrického proudu plazmatu P_F označuje fúzní výkon, P_H výkon ohřevu plazmatu systémem HCD, P_R tepelný výkon reaktoru, P_{GR} hrubý elektrický výkon elektrárny, P_{SC} vlastní spotřebu elektrárny s výjimkou spotřeby systému HCD, P_{NET} čistý výkon elektrárny do rozvodné sítě, η_H účinnost systému HCD a P_H/η_H příkon systému HCD.



Obr. 3: Schéma recirkulace výkonu fúzní elektrárny s pulsním reaktorem. ESS TH označuje zásobník tepelné energie, ESSEL zásobník elektrické energie

výkonu M_R je definovaný jako poměr celkového výkonu generovaného ve fúzním reaktoru vůči fúznímu výkonu P_F . Tepelný výkon energetického fúzního reaktoru P_R v ustáleném stavu lze s pomocí výkonových faktorů zapsat jako součet transformovaného fúzního výkonu multiplikovaného při výrobě tritia a zpětně vyzařovaného výkonu ohřevu plazmatu:

$$P_R = P_F \left(M_R + \frac{1}{Q} \right) \quad (2)$$

Účinnost recirkulace výkonu

Účinnost recirkulace výkonu je definována jako podíl výkonu ohřevu předaného do plazmatu P_H vůči části

tepelného výkonu reaktoru využité pro recirkulaci výkonu. Tuto účinnost lze určit na základě parciálních účinností jednotlivých za sebou jdoucích procesů: konverze tepelné energie na elektrickou, vlastní spotřeby elektrárny a konverze elektrické energie na tepelnou energii plazmatu v reaktoru. Protože bude recirkulující výkon započítán do celkových výkonových toků již v projektové fázi, bude účinnost jeho konverze z tepelné energie na elektrickou shodná s hrubou účinností výroby elektrické energie. Procentuální vliv vlastní spotřeby bude také shodný. Proto lze účinnost recirkulace η_{REC} zapsat rovnicí:

$$\eta_{REC} = \eta_{GR} \eta_{SC} \eta_H \quad (3),$$

kde η_{GR} je hrubá elektrická účinnost elektrárny, η_H je účinnost konverze elektrické energie do tepelné energie plazmatu a faktor η_{SC} charakterizuje vlastní spotřebu elektrárny:

$$\eta_{SC} = 1 - \frac{P_{SC}}{P_{GR}} \quad (4).$$

Vliv pulsního režimu na účinnost recirkulace lze popsat koeficienty pulsního režimu η'_{PO} a η''_{PO} . Koeficient η'_{PO} popisuje vliv zásobníku tepelné energie, koeficient η''_{PO} popisuje vliv zásobníku elektrické energie (**obr. 3**). Pulsní provoz reaktoru je charakterizován délkou pulsu t_{BT} (burn time) a délkou prodlevy t_{DT} (dwell time). V době prodlevy nebude tepelný výkon reaktoru nulový a bude tvořen zbytkovým tepelným výkonem reaktoru P_{DH} (decay heat). Rovnice pro koeficienty jsou následující:

$$\eta'_{PO} = \frac{(t_{BT} \eta_{ESS}^{TH} + t_{DT} \epsilon_{DH})}{(t_{BT} \eta_{ESS}^{TH} + t_{DT})} \quad (5),$$

$$\eta''_{PO} = \eta_{ESS}^{EL} (t_{BT} + t_{DT}) / t_{BT} \quad (6),$$

$$\epsilon_{DH} = \frac{P_{DH}}{P_R} \quad (7),$$

kde η_{ESS}^{TH} je účinnost zásobníku tepelné energie, η_{ESS}^{EL} je účinnost zásobníku elektrické energie a ϵ_{DH} je faktor zbytkového tepelného výkonu. Zbytkový tepelný výkon reaktoru je dobře známý ze štěpných jaderných reaktorů, v případě fúzního energetického reaktoru bude vyvíjen sekundárně aktivovanou konstrukcí jaderné zóny reaktoru a dosáhne řádově jednotky procent fúzního výkonu [11]. Účinnost recirkulace výkonu elektrárny s pulsním reaktorem je pak:

$$\eta_{REC} = \eta'_{PO} \eta_{GR} \eta_{SC} \eta''_{PO} \eta_H \quad (8).$$

Při účinnosti recirkulace rovné jedné by recirkulace výkonu neměla žádný vliv na výrobu elektrické energie.

V praxi bude účinnost recirkulace vždy menší než jedna a recirkulace výkonu bude zdrojem ztrát s dopadem na výstupní výkon a čistou účinnost elektrárny.

Čistá účinnost fúzní elektrárny

Výkonová bilanční rovnice v uzlu hrubého elektrického výkonu elektrárny s kontinuálně pracujícím reaktorem podle **obr. 2** má tvar:

$$P_{GR} = \frac{P_H}{\eta_H} + P_{SC} + P_{NET} \quad (9).$$

Z této rovnice lze odvodit vztah pro tepelnou čistou účinnost fúzní elektrárny η_{NET} :

$$\eta_{NET} = \eta_{GR} \eta_{SC} - \frac{1}{\eta_H (QM_R + 1)} \quad (10),$$

kde součin $\eta_{GR} \eta_{SC}$ představuje čistou účinnost elektrárny bez recirkulace výkonu a druhý člen reprezentuje vliv recirkulace výkonu.

V případě elektrárny s pulsním reaktorem má výkonová bilanční rovnice v uzlu hrubého elektrického výkonu elektrárny tvar podle **obr. 3**:

$$P_{GR} = P_H^B + P_{SC} + P_{NET} \quad (11).$$

Vztah pro čistou účinnost pak zahrnuje koeficienty pulsního režimu:

$$\eta_{NET} = \eta_{GR} \eta_{SC} \eta'_{PO} - \frac{1}{\eta_H \eta''_{PO} (QM_R + 1)} \quad (12).$$

Rovnice (10) a (12) pro kontinuální a pulsní provoz mohou být přepsány do sjednocující rovnice:

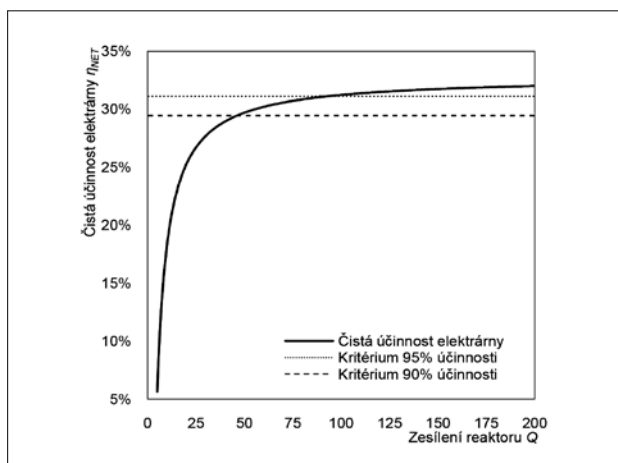
$$\eta_{NET} = \eta_{NET}^{NOREC} (1 - \epsilon_{REC}) \quad (13),$$

kde η_{NET}^{NOREC} označuje čistou účinnost elektrárny bez recirkulace výkonu a ϵ_{REC} je faktor recirkulace:

$$\epsilon_{REC} = \frac{1}{\eta_{REC} (QM_R + 1)} \quad (14).$$

Rovnice (13) je finální rovnicí vyjadřující vliv recirkulace výkonu na čistou účinnost fúzní elektrárny. **Obr. 4** ukazuje závislost čisté účinnosti fúzní elektrárny s tlakovodním chlazením o parametrech PWR na zesílení reaktoru Q , vyvolanou fundamentálním vlivem recirkulace výkonu.

Faktor ϵ_{REC} je vedle účinnosti η_{REC} druhým parametrem recirkulace. Účinnost η_{REC} charakterizuje průběh recirkulace výkonu, kterou zajišťuje technologie elektrárny



Obr. 4: Závislost čisté účinnosti na zesílení reaktoru Q. Kritéria 90%, resp. 95% účinnosti ukazují, při jakém zesílení Q klesne vliv recirkulace energie pod 10%, resp. 5%

mimo fúzní reaktor, a identifikuje ztráty vznikající při recirkulaci výkonu. Faktor ϵ_{REC} kromě ztrát vznikajících při recirkulaci zahrnuje také výkonové parametry reaktoru, faktor zesílení Q a faktor multiplikace výkonu M_r , a popisuje vliv ztrát při recirkulaci výkonu na výstupní výkon elektrárny.

Závěr

Fúzní elektrárny budou charakteristické recirkulací vysokého elektrického výkonu, nutného pro ohřev a generování elektrického proudu plazmatu. Vlastní recirkulace výkonu by neměla žádný dopad na výrobu elektrické energie, pokud by probíhala bez ztrát, protože výkon vložený do plazmatu se vrací zpět. Ztráty související s recirkulací výkonu v zařízení elektrárny však způsobí pokles čisté účinnosti výroby elektrické energie. Odvozené vztahy kvantifikují tyto ztráty i výsledný vliv recirkulace výkonu na čistou účinnost elektrárny. Vliv recirkulace výkonu lze významně snížit jednak dosažením vysokého faktoru zesílení reaktoru Q a jednak zvýšením účinnosti jednotlivých zařízení podílejících se na recirkulaci výkonu na straně technologií elektrárny, především systému konverze tepelné energie na elektrickou a systému ohřevu a generování elektrického proudu plazmatu HCD. Zvýšení účinnosti konverze tepelné energie na elektrickou spočívá především v optimalizaci tepelného oběhu elektrárny, aby v maximální míře využíval specifické vlastnosti fúzního energetického reaktoru, například použitím tepelného oběhu s nadkritickým CO_2 [12]. Zvýšení účinnosti systémů HCD je jedním z důležitých úkolů fúzního výzkumu. Současná účinnost systémů HCD je 20–30%, avšak probíhající výzkum naznačuje dosažitelnou účinnost na úrovni až 60% [13].

Popsané ztráty při recirkulaci výkonu nijak nesnižují atraktivitu fúzních elektráren. Jaderná fúze nabídne zcela bezpečný a bezemisní energetický zdroj

s nevyčerpatelnými zásobami paliva. Fúzní elektrárna o velikosti jaderné elektrárny v Temelíně spotřebuje denně pouhé dva kilogramy vodíkových izotopů, přičemž odpadem výroby bude široce využitelné inertní helium. Recirkulace výkonu proto představuje především technickou zajímavost a inženýrskou výzvu k optimalizaci technologických zařízení elektrárny.

Poděkování

Aktivita byla podpořena Strategii Akademie věd AV21 v rámci výzkumného programu „Systémy pro jadernou energetiku“.

Literatura:

- [1] S. Entler. Fúzní palivo a obnovitelné zdroje. *Energetika* 5 (2015), 249–252.
- [2] F. Romanelli. *Fusion Electricity. A roadmap to the realization of fusion energy*. EFDA, 2012, dostupné na <https://www.euro-fusion.org/downloads/>.
- [3] J. D. Lawson. Some criteria for a power producing thermonuclear reactor. *Proc. Phys. Soc. B* 70, 6 (1957); původně výzkumná zpráva: A.E.R.E. Report GP/R 1807, Harwell, Berks 1955, A.E.R.E. Amplified version, Harwell, Berks 1956.
- [4] J. Pamela et al. Efficiency and availability driven R&D issues for DEMO. *Fusion Engineering and Design* 84 (2009) 194–204.
- [5] R. Wenninger et al. The physics and technology basis entering European system code studies for DEMO. *Nucl. Fusion* 57 (2017) 016011.
- [6] D. Maisonnier et al. A conceptual study of commercial fusion power plants. Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS). EFDA-RP-RE-5.0, 2005, dostupné na <https://www.euro-fusion.org/downloads/>.
- [7] S. Entler. Engineering Breakeven. *Journal of Fusion Energy*, 34 (2015) 513–518.
- [8] S. Entler. Lawsonovo kritérium – kritérium fúzní energetiky. *Čes. časopis pro fyziku*, 64 (2014), 161.
- [9] S. Entler. Jaderná fúze – budoucnost energetiky. *Energetika* 3 (2015), 136.
- [10] Fusion Energy – Cleaner Energy for the Future. EFDA, 2006, © Copyright 2005 FOM-Rijnhuizen/ Verdult – Kennis in Beeld, the Netherlands.
- [11] S. Zheng S. et al. Preliminary evaluation of decay heat in a HCPB DEMO fusion reactor, *Progress in Nuclear Science and Technology* 4 (2014) 126–129.
- [12] L. Vesely et al. Study of the cooling systems with S-CO_2 for the DEMO fusion power reactor. *Fusion Engineering and Design*, v tisku, DOI 10.1016/j.fusengdes.2017.05.029.
- [13] R. McAdams. Beyond ITER: Neutral beams for a demonstration fusion reactor (DEMO). *Review Of Scientific Instruments* 85, 02b319 (2014).

Ing. Slavomír Entler – pracuje v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR. Zabývá se vývojem diagnostických přístrojů pro fúzní reaktory a problematikou integrace fúzních reaktorů do energetiky.

Doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc. – je vedoucím Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze. Zabývá se problematikou energetických zdrojů, tepelných oběhů a výzkumem dvoufázového proudění v energetických systémech se zaměřením na zvyšování účinnosti a spolehlivosti parních turbín.

Doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D. – je garantem programu Jaderná energetická zařízení Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT. Zabývá se problematikou jaderných energetických zařízení s důrazem na termohydrauliku a bezpečnost jaderných reaktorů.

Recenze: **prof. Ing. Josef Kott, DrSc., Ing. Karel Katovský, Ph.D.**