

## Czy elektrownie jądrowe mogą pracować w systemie nadążania za obciążeniem?

Praktyka wykazuje, że tak!

Rozróżniamy trzy typy elastycznej eksploatacji elektrowni jądrowych

- Eksploatacji z regulacją częstotliwości, w której elektrownia pracuje na mocy mniejszej od mocy nominalnej (MN) i jej moc zmienia się automatycznie w odpowiedzi na zmiany częstotliwości w sieci
- Eksploatacja profilowana, w której operator oferuje okresowe zmiany mocy tworząc profil zmienny w ciągu dnia (typowo profil ten obejmuje dwie zmiany w ciągu 24 godzin, ze zmniejszoną mocą w czasie nocy)
- Nadążanie za obciążeniem, gdy operator elektrowni otrzymuje od operatora systemu polecenia wykonania manewrów z krótkim wyprzedzeniem czasowym, tak by zmieniać moc elektrowni stosownie do zmiennych potrzeb systemu.

W przypadku pracy z nadążaniem za obciążeniem główne parametry elektrowni jądrowej to gradient zmian mocy (szybkość zmian mocy), wielkość zmian mocy i minimalna moc.

Zmiana mocy elektrowni jądrowej jest zawsze możliwa. W przypadku reaktora z wodą pod ciśnieniem PWR zmiany mocy realizuje się głównie przez zmianę położenia prętów regulacyjnych. Dokładną regulację reaktywności w rdzeniu reaktora wykonuje się zmieniając stężenie kwasu borowego w obiegu pierwotnym. Temperatura chłodziwa pozostaje stała przy zmianach mocy w granicach od 60% do 100% MN, co zapewnia obniżenie naprężeń termicznych.

W przypadku reaktora z wodą wrzącą BWR zmiany mocy można realizować albo przy pomocy prętów regulacyjnych w zakresie poniżej 60% MN albo przez zmiany wydatku wody w rdzeniu (zmiana mocy pomp recyrkulacyjnych) w zakresie od 60% do 100% MN. Zmiana wydatku chłodziwa przez rdzeń reaktora wpływa na spowalnianie neutronów, a w związku z tym na reaktywność – a więc na moc reaktora. Jest to preferowana metoda pracy w systemie nadążania za obciążeniem, ponieważ nie powoduje ona naprężeń termicznych w paliwie i rozkład mocy jest niemal stały. W obu typach reaktorów temperatura i ciśnienie pary napływającej do turbiny pozostają stałe.

Elektrownie jądrowe II generacji w Niemczech są zaprojektowane tak, by mogły zmieniać swą moc w tempie 10% MN/min, a normalną praktyką jest zmienianie mocy w tempie 2,5 do 5% MN/min. Przy mocy ośmiu pracujących obecnie w Niemczech reaktorów wynoszącej około 10,6 GW, mogą one zmieniać moc o 5,3 GW w ciągu 15 minut przy gradiencie mocy wynoszącym 5% MN na minutę w zakresie do 50% MN.

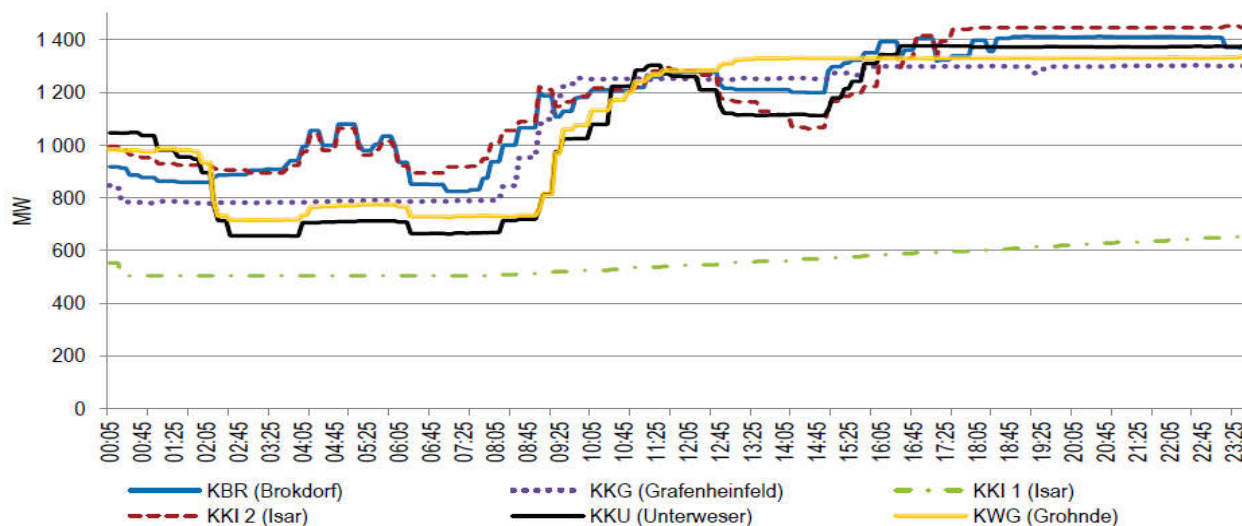
Cykliczne zmiany mocy są normalnym elementem eksploatacji reaktorów w Niemczech. W szczególności ustaloną praktyką jest związanie mocy elektrowni bezpośrednio z częstotliwością sieci, tak że zmiany mocy następują bez interwencji operatora. Zakres zmian typowo ograniczony jest do 5% MN. Taki reżym pracy sprawdza się podczas testów rozruchowych elektrowni i większość elektrowni jądrowych w Niemczech pracuje w tym systemie. Możliwe są i większe zmiany mocy, np. w sierpniu 2015 roku w bloku nr. 2 w elektrowni jądrowej Philippsburg na żądanie operatora przeprowadzono redukcję mocy o 14% (200 MWe) w ciągu 30 sekund a następnie powrót do pełnej mocy nominalnej w ciągu 15 minut<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> IAEA Non-baseload operation in nuclear power plants: load following and frequency control modes of flexible operation IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.23, Vienna 2018

Pozytywne doświadczenie w pracy z nadążaniem za obciążeniem w niemieckich elektrowniach jądrowych wykazało, że zmiany mocy o 400 MWe w ciągu 15 minut są możliwe i wystarczają zupełnie do pokrycia zmian mocy potrzebnych ze względu na fluktuacje mocy wiatru.

Na **rys. 1** pokazano zmiany mocy elektrowni jądrowych w Niemczech w ciągu doby, rejestrowane co pół godziny od północy do północy. Ich moc zmienia się od 650 do 1400 MW, a więc w granicach od 46% do 100% MN.



Rys. 1 Zmiany mocy w funkcji obciążenia w niemieckich EJ w ciągu 24 h

Francuskie EJ pracują podobnie. Gradient mocy wynosi tam 5% MN/min w zakresie mocy od 30% do 100%, oraz +/- 2,5% dla krótkoterminowej modulacji częstotliwości (kilka sekund). Jest to konieczne ze względu na duży udział elektrowni jądrowych w mocy francuskiego systemu elektroenergetycznego (około 75%)<sup>2</sup>. Elektrownie jądrowe muszą więc być przystosowane do całodobowych i tygodniowych zmian obciążenia, a także do całkowitych przerw w pracy przez kilka godzin lub dni.

Poza Niemcami i Francją, także w elektrowniach jądrowych w Belgii, Finlandii, Szwajcarii i na Węgrzech stosuje się albo nadążanie za obciążeniem, albo modulację mocy lub stabilizację częstotliwości w sieci. Potrzeba pracy w systemie nadążania za obciążeniem zależy od krajowego lub regionalnego mixu energetycznego. Na przykład w krajach skandynawskich, gdzie występuje duży udział hydroenergii, lub w krajach o dominującym udziale spalania paliw organicznych, równowagę przerywanej i zmiennej mocy OZE zapewniają zmiany mocy hydroelektrowni lub elektrowni z paliwem organicznym.

W elektrowniach jądrowych III generacji zmiany mocy od 100% MN do 25% MN są uwzględniane od samego początku projektowania. Np. dla reaktora EPR zaprojektowano dwa profile nadążania za obciążeniem:

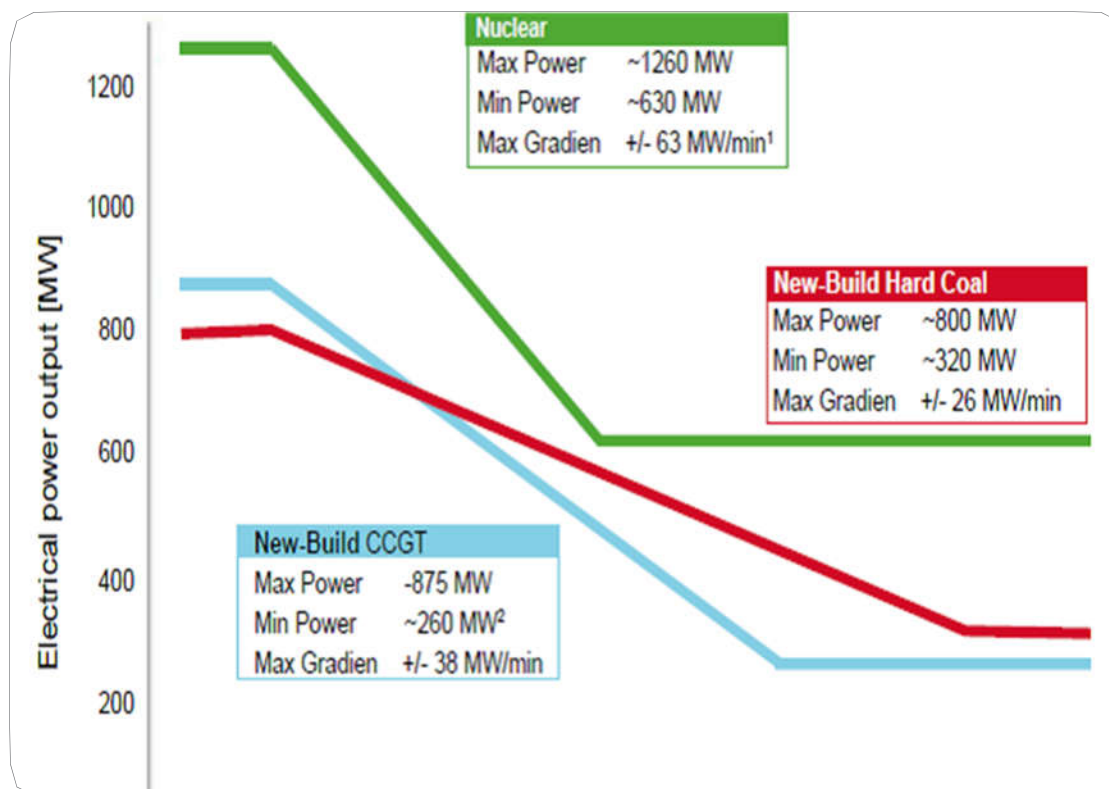
- Nadążanie za obciążeniem w granicach od 60% do 100% MN w tempie 5% MN/min (przy wypaleniu paliwa do 80%),
- Nadążanie za obciążeniem w granicach od 25% do 60% MN w tempie 2,5% MN/min.

W zakresie od 25% do 100 % MN blok EPR może zapewnić rezerwę +/- 2,5% MN dla pierwotnej regulacji częstotliwości w sieci z maksymalną szybkością zmian mocy 1% MN/sek.

<sup>2</sup> <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx#ECSArticleLink8>

- W zakresie od 25% do 60 % MN blok EPR może zapewnić rezerwę +/- 4,5% MN dla wtórnej regulacji częstotliwości w sieci z maksymalną szybkością zmian mocy 1% MN/sek,
- W zakresie od 60% do 100 % MN blok EPR może zapewnić rezerwę +/- 10% MN dla wtórnej regulacji częstotliwości w sieci z maksymalną szybkością zmian mocy 2% MN/sek.<sup>3</sup>

Nowe elektrownie jądrowe mogą zmieniać swą moc w granicach od 1260 MW do 630 MW z szybkością około 63 MW/min<sup>4</sup>. Jak pokazuje rys. 2 jest to elastyczność lepsza niż dla elektrowni węglowych lub gazowych.



Rys. 2 Szybkość zmian mocy w elektrowniach węglowych, gazowych CCGT i nowych elektrowniach jądrowych, dane wg raportu SNETP 2017.

Jak widać z rys. 2 przedziały czasu, w ciągu których moc elektrowni systemowych może być zmieniana, są podobne. Elektrownia jądrowa może zmienić moc o 630 MW w ciągu 10 minut, elektrownia na węgiel kamienny o 480 MW w ciągu 12 minut i elektrownia gazowa CCGT (cykl kombinowany z turbiną gazową) o 500 MW w ciągu 21 minut. Daje to szybkości zmian mocy równe odpowiednio 63 MW/min, 26 MW/min i 38 MW/min.

Tak więc elektrownie jądrowe nie tylko mogą pracować w systemie nadążania za obciążeniem, ale mogą robić to lepiej niż elektrownie węglowe i gazowe.

W niemieckich elektrowniach jądrowych już w 2010 r. można było realizować zmiany mocy do 10 000 MW. We Francji średnio 2 z 3 reaktorów może kompensować zmiany obciążenia,

<sup>3</sup> UK EPR Pre-Construction Safety Report Chapter 1: Introduction And General Description Document ID. No. UKEPR-0002-012 Issue 03, Subchapter 1.2 page 31

<sup>4</sup> [http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2017/07/SNETP-FACTSHEET-7-Load-following-capabilities\\_final.pdf](http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2017/07/SNETP-FACTSHEET-7-Load-following-capabilities_final.pdf)

całkowita możliwa zmiana mocy dla floty reaktorowej wynosi 21 000 MW (jest to równoważne mocy 21 reaktorów) w ciągu mniej niż 30 minut, a dodatkowo można tymczasowo odłączyć od sieci elektroenergetycznej bloki jądrowe i uruchomić je ponownie. Jeśli utrzymywane są w stanie gotowości na gorąco to mogą powrócić do pracy na pełnej mocy w ciągu kilku godzin.

Wytyczne European Utilities Requirements (EUR) określające warunki bezpiecznej i niezawodnej eksploatacji elektrowni jądrowych zawierają wymaganie, by elektrownie te nadawały się do regulacji częstotliwości (pierwotnej i wtórnej) w sieci oraz pozwalały na dostosowanie mocy do obciążenia. Najlepsze już istniejące elektrownie jądrowe II generacji spełniają te wymagania, a elektrownie III generacji są w pełni zgodne z wymaganiami EUR.

### **Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych przy pracy z nadążaniem za obciążeniem**

Zasadniczym warunkiem do spełnienia przy pracy z nadążaniem za obciążeniem jest bezpieczeństwo jądrowe. Nie wszystkie elektrownie jądrowe II generacji były przystosowane do pracy elastycznej i wpływ częstych zmian mocy trzeba było w każdym przypadku rozważyć i ocenić w raporcie bezpieczeństwa. Szereg elektrowni pracowało jednak w systemie nadążania za obciążeniem przez dziesięciolecia<sup>5</sup>, utrzymując wysoką dyspozycyjność i bezpieczeństwo. Wszystkie występujące przy tym stany eksploatacyjne były przeanalizowane i opisane w raportach bezpieczeństwa. W elementach narażonych na naprężenia termiczne, szczególnie w prętach paliwowych, prowadzona jest okresowa kontrola odkształceń zmęczeniowych.

W przypadku reaktorów III generacji praca z nadążaniem za obciążeniem jest uwzględniana w projekcie od samego początku projektowania.

---

<sup>5</sup> W. Timpf and M. Fuchs, "Lastwechselfähigkeiten von Kernkraftwerken - Erfahrungen und Ausblick," atw, May 57. Jg Issue 5 2012