

Praktyczne aspekty udziału elektrowni wodnych
w procesie transformacji energetycznej ze
szczególnym uwzględnieniem magazynowania
energii i świadczenia usług elastyczności

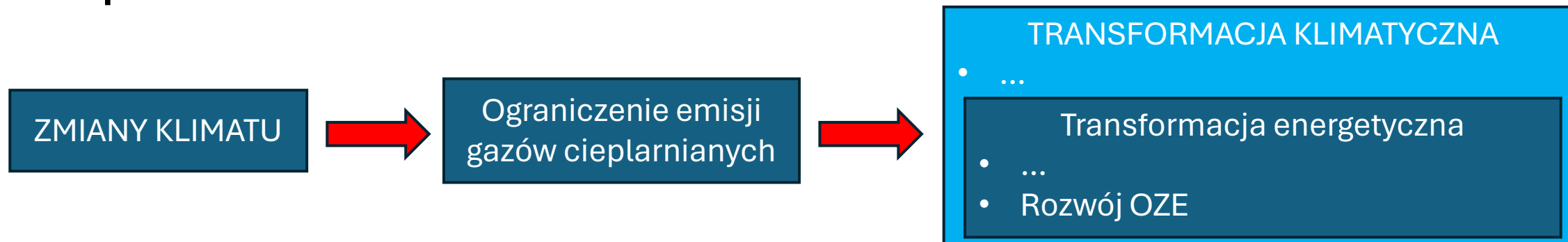
Mariusz Lewandowski

Maciej Kaniecki

Stanisław Lewandowski



Wprowadzenie



- Moc zainstalowana w KSE w 2020-2023 – wzrost o ponad 1/3 (głównie poprzez PV i wiatr)
- PL: do 2040 szacowane 59% z OZE (UE: 85%) ⇒ nasycenie nieregulowanymi źródłami ⇒ **brak elastyczności**
- **Dziś:**
 - Mimo około trzykrotnie niższego udziału OZE w produkcji en.el. częste interwencje polegające na wyłączaniu instalacji OZE;
 - Narastający problem braku mocy do pokrycia krajowego zapotrzebowania;
 - Efekty planowanych inwestycji i modernizacji najszybciej w średnim horyzoncie czasowym.
- **Energetyka wodna** – odpowiedź na niektóre z tych problemów
 - Stabilne źródło wytwarzania, a elektrownie zbiornikowe i szczytowo-pompowe to jedno z najbardziej dyspozycyjnych źródeł
 - Elektrownie szczytowo-pompowe i zbiornikowe jako magazyny energii o dużej średnio- i długoterminowej pojemności
 - Przy niewielkich nakładach inwestycyjnych i zmianach dotychczasowych warunków gospodarowania wodą zapewnią bardzo dobre właściwości regulacyjne

Elektrownie wodne w Polsce

~800 EWo w Polsce

$P_{\text{inst}} > 5 \text{ MW}$

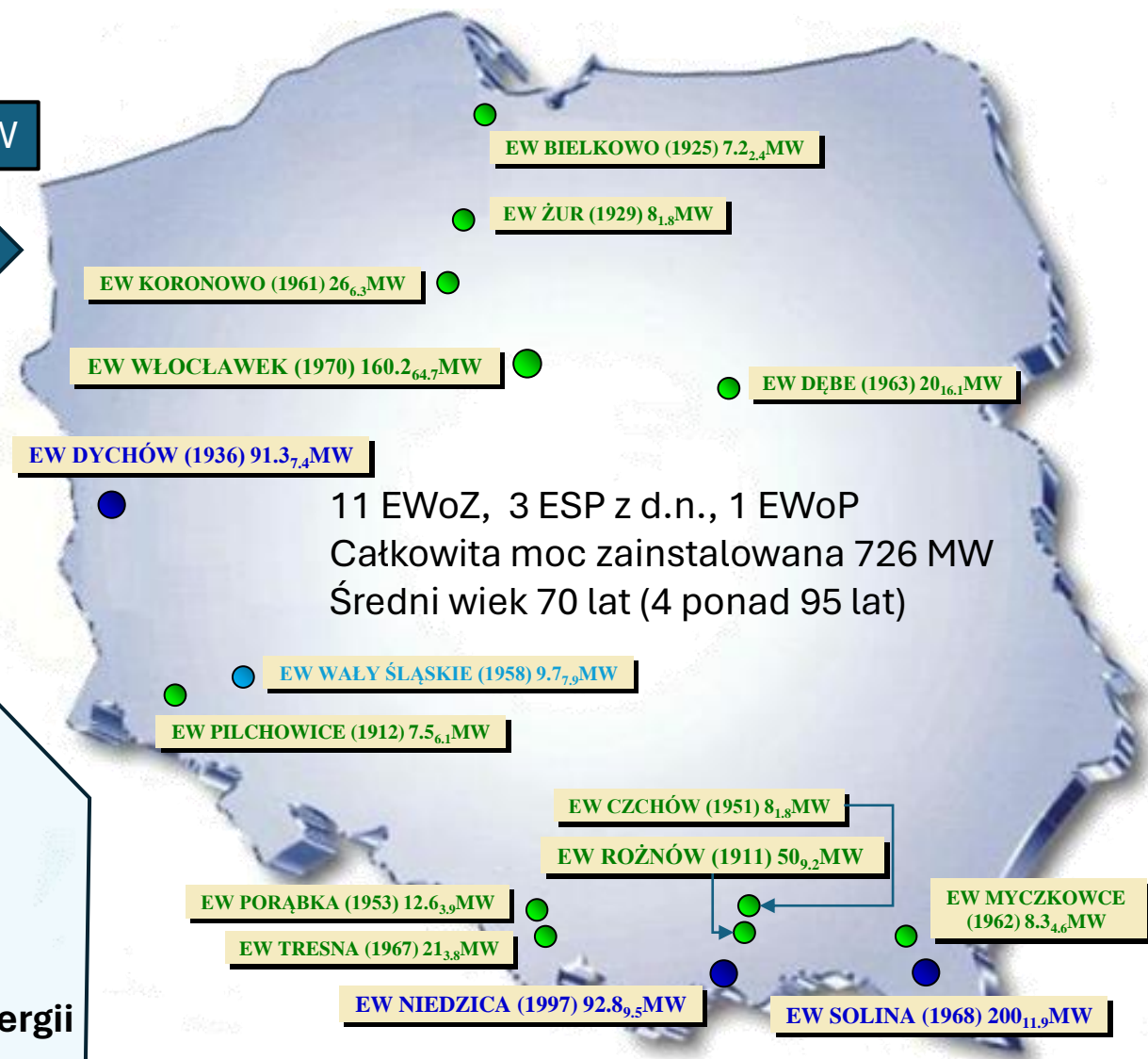
$P_{\text{inst}} < 5 \text{ MW}$

MEWo (głównie MEWoP)

W większości generatory asynchroniczne

- ograniczony udział w regulacji parametrów sieci w LOB
- doposażenie np. w magazyny akumulatorowe
⇒ możliwości reg.-stabil. w LOB
- MEWo ze zb.górnym ⇒ magazynowanie energii
- MEWo dodatkowo ze zb. dolnym + doposażenie w człony pompowe
⇒ wzrost możliwości regulacyjnych
- Cable pooling, linia bezpośrednia szansą dla 140 MEWo ze zbiornikami
- miniESP współpracujące z farmami PV i EWi

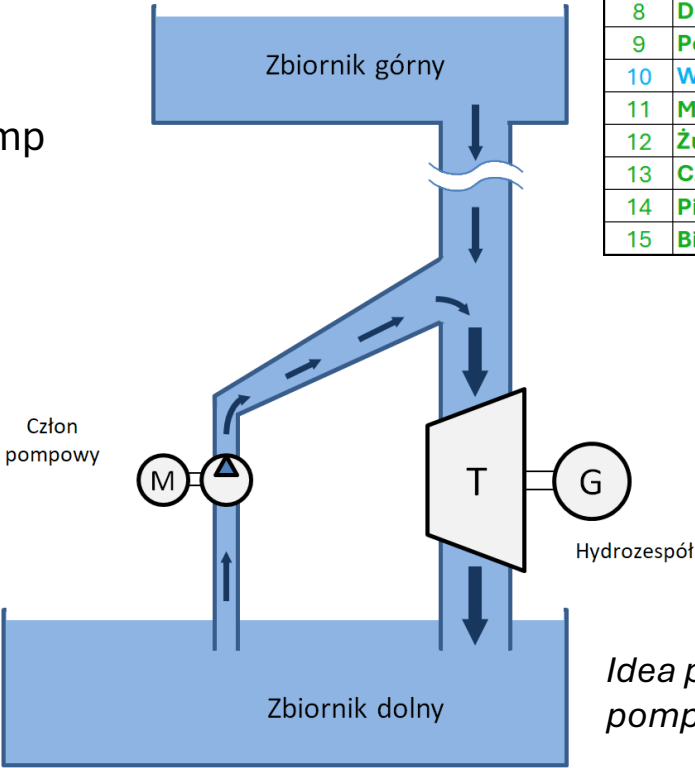
HYBRYDYZACJA MEWo ⇒ podniesienie bezpieczeństwa dostaw energii



Elektrownie wodne w Polsce > 5MW

- Wskazana modernizacja
⇒ hybrydyzacja poprzez doposażenie w **BESS , PV na zb., EWi**
- Przekształcenie EWoZ w ESP poprzez doposażenie w **człony pompowe**:
 - korzystniejsze gospodarowanie retencją wodną,
 - zwiększenie pasma regulacji mocy czynnej,
 - możliwość płynnej i ciągłej regulacji w zakresie mocy pobieranej z systemu przy zastosowaniu:
 - **układów zmiennoodrotowych** napędów pomp
 - pracy w systemie **zwarcia hydraulicznego**

Zmiany te wymagają dość dużych nakładów i konieczne jest systemowe wsparcie inwestycyjne i operacyjne



| | Elektrownia | Rodzaj elektrowni | budowa / modernizacja | moc zainstal. MW | moc naturalna MW |
|----|--------------|-------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| 1 | Solina | ESP+dn | 1968 / 2003 | 136 / 200 | 11,9 |
| 2 | Włocławek | EWoZ | 1970 | 160,2 | 64,7 |
| 3 | Niedzica | ESP+dn | 1997 | 92,8 | 9,5 |
| 4 | Dychów | ESP+dn | 1936 | 79,5 / 91,3 | 7,4 |
| 5 | Rożnów | EWoZ | 1911 | 50 | 9,2 |
| 6 | Koronowo | EWoZ | 1961 | 26 | 6,3 |
| 7 | Tresna | EWoZ | 1967 | 21 | 3,8 |
| 8 | Dębe | EWoZ | 1963 | 20 | 16,1 |
| 9 | Porąbka | EWoZ | 1953 | 12,6 | 3,9 |
| 10 | Wały Śląskie | EWoP | 1958 | 9,7 | 7,9 |
| 11 | Myczkowce | EWoZ | 1962 | 8,3 | 4,6 |
| 12 | Żur | EWoZ | 1929 | 8 | 1,8 |
| 13 | Czchów | EWoZ | 1951 | 8 | 2,8 |
| 14 | Pilchowice | EWoZ | 1912 | 7,5 | 6,1 |
| 15 | Bielkowo | EWoZ | 1925 | 7,2 | 2,4 |

Idea pracy elektrowni zbiornikowej z członem pompowym w systemie zwarcia hydraulicznego

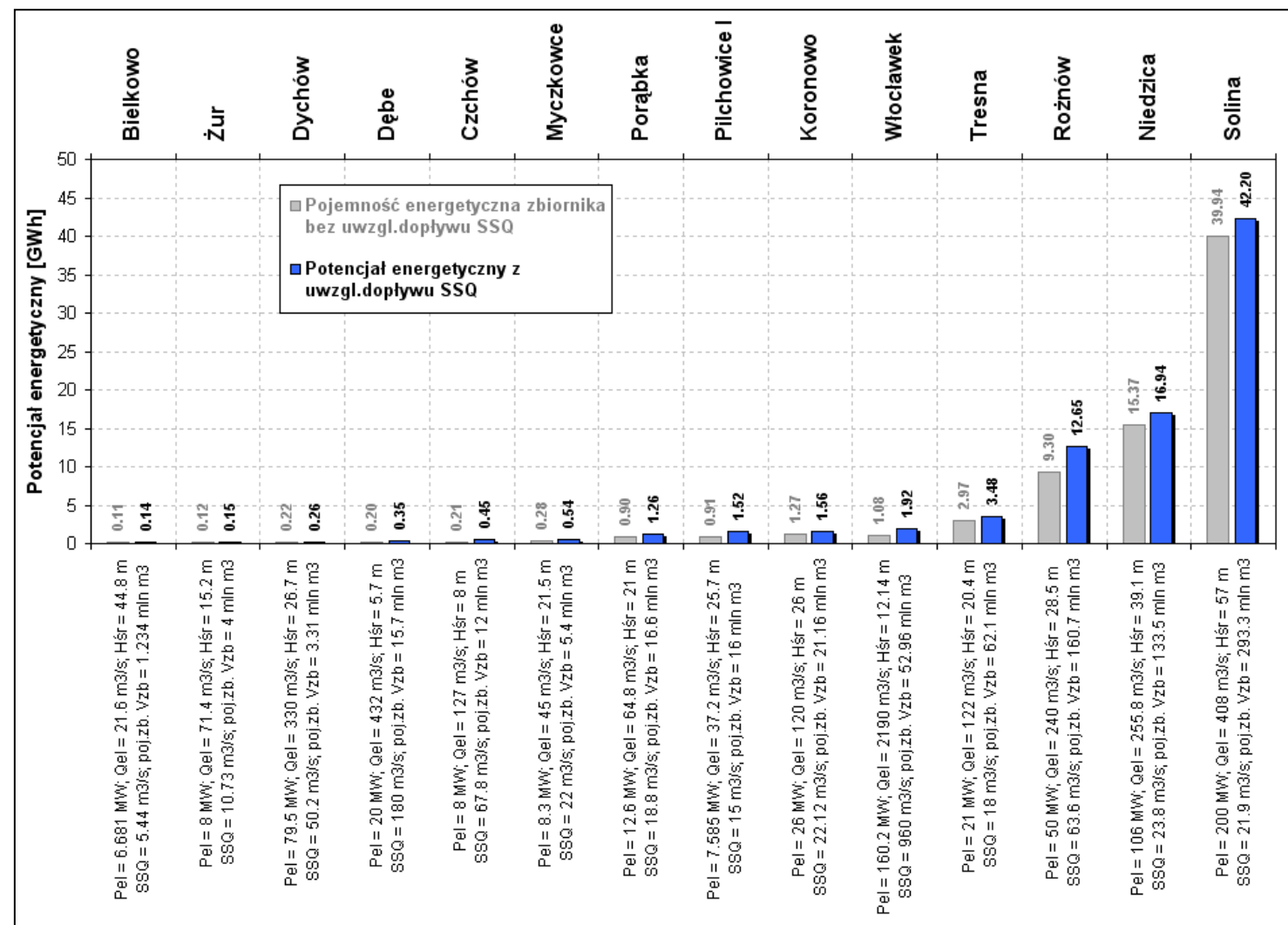
Magazynowanie energii w zbiornikach wodnych hydroelektrowni

Teoretyczne możliwości akumulacyjne elektrowni zbiornikowych o mocy powyżej 5 MW

Sumaryczny potencjał energetyczny magazynu energetycznego reprezentowanego przez wszystkie analizowane elektrownie (powyżej 5 MW):

83.43 GWh

(z uwzględnieniem dopływu o wartości SSQ dla każdego hydrozwiązła)



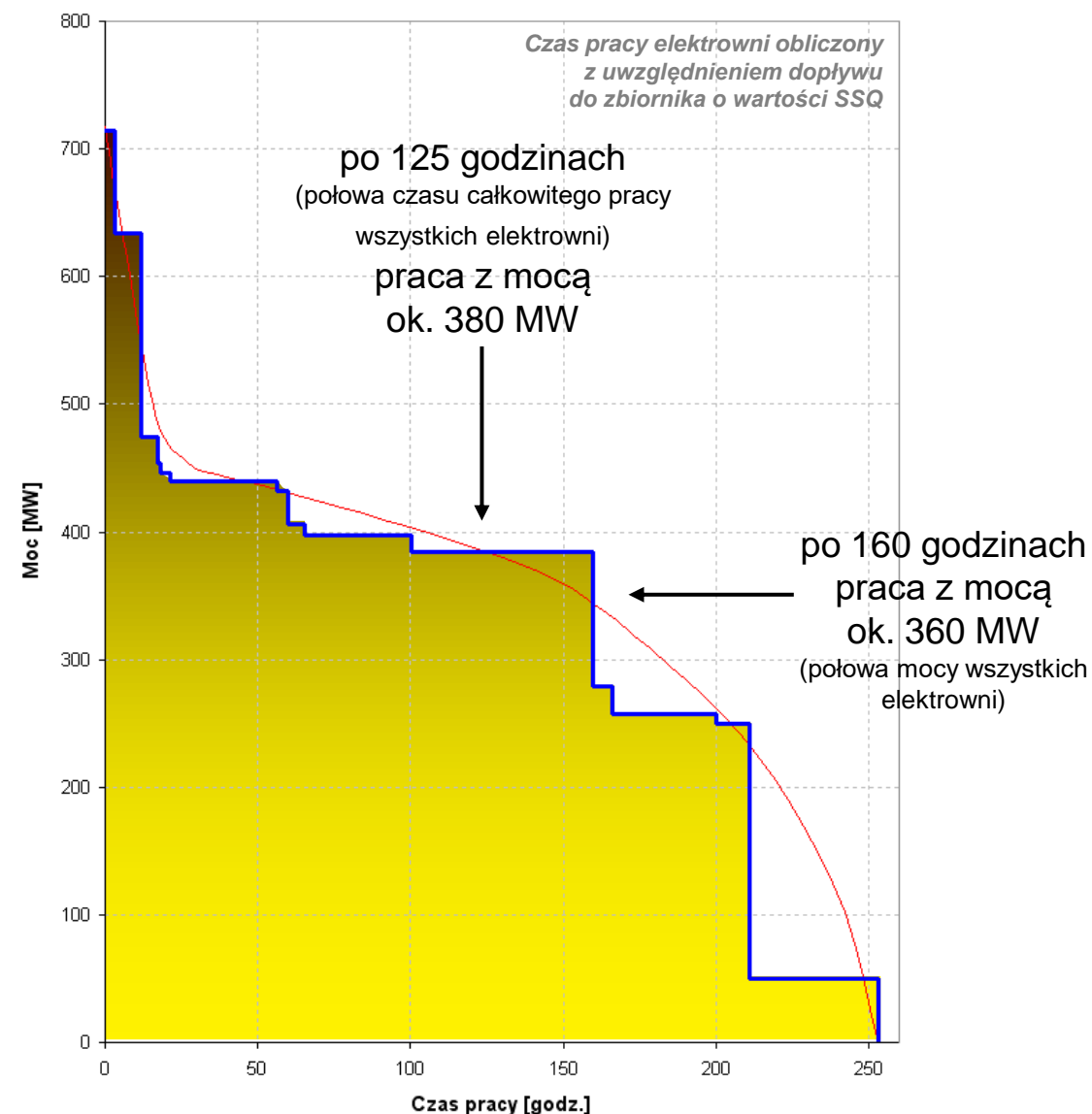
Magazynowanie energii w zbiornikach wodnych hydroelektrowni

Teoretyczne możliwości akumulacyjne elektrowni zbiornikowych o mocy powyżej 5 MW

Sumaryczny potencjał energetyczny magazynu energetycznego reprezentowanego przez wszystkie analizowane elektrownie (powyżej 5 MW):

83.43 GWh

(z uwzględnieniem dopływu o wartości SSQ dla każdego hydrozwiązła)



Magazynowanie energii w zbiornikach wodnych hydroelektrowni

Bariery wykorzystania pełnych projektowych możliwości magazynowania wody w zbiornikach górnych:

- aktywny udział energetyki wodnej w gospodarowaniu wodą na stopniach wodnych
 - ochrona przeciwpowodziowa
 - przeciwdziałanie suszom
- działania organizacji ekologicznych argumentujących, że wpływ wahań poziomu wody w zbiornikach na środowisko jest negatywny

Zmiany pierwotnych, projektowych uwarunkowań funkcjonowania istniejących EWoZ oznaczają:

- nieefektywne wykorzystanie potencjału hydroenergetycznego stopnia wodnego
- eliminowanie projektowego celu funkcjonowania tych elektrowni, jako źródeł szczytowych i podszczytowych wytwarzania energii.

Uwolnienie możliwości magazynowych w zbiornikach EWoZ (przywrócenie projektowych możliwości wahanía poziomu wody) wymaga weryfikacji aktualnych teoretycznych możliwości magazynowania energii w zbiornikach wodnych z uwzględnieniem:

- badania wpływu wahań poziomu wody w zbiornikach na środowisko naturalne
- analiz danych statystycznych o przepływach wody w ciekach zasilających zbiorniki
- analiz częstości występowania i natężenia ekstremalnych zjawisk pogodowych

Magazynowanie energii w zbiornikach wodnych hydroelektrowni

Zwiększenie wielkości magazynowych zbiorników:

- Wprowadzenie systemu *dynamicznego sterowanie rezerwą powodziową* (w ogólności: maksymalizacja poziomu wody górnej poprzez zwiększenie wykorzystania rezerwy powodziowej)
 - wymagane wiarygodne prognozy meteo- i hydrologiczne realizowane przez służby gospodarki wodnej
 - zachęta w postaci systemu partycypacji gospodarki wodnej w zyskach elektrowni wynikających ze zwiększonej produkcji
- Podwyższanie poziomu piętrzenia poprzez:
 - stosowanie dodatkowych konstrukcji na koronach zbiorników (niskonakładowe, krótki horyzont czasowy realizacji)
 - nadbudowa korony zapory i obwałowań (wysokonakładowe, długi horyzont czasowy realizacji)
- Doposażenie w człony pompowe
 - konieczne zapewnienie dolnego zbiornika,
 - długi horyzont czasowy realizacji, ale zdecydowanie krótszy od realizacji projektu nowej ESP

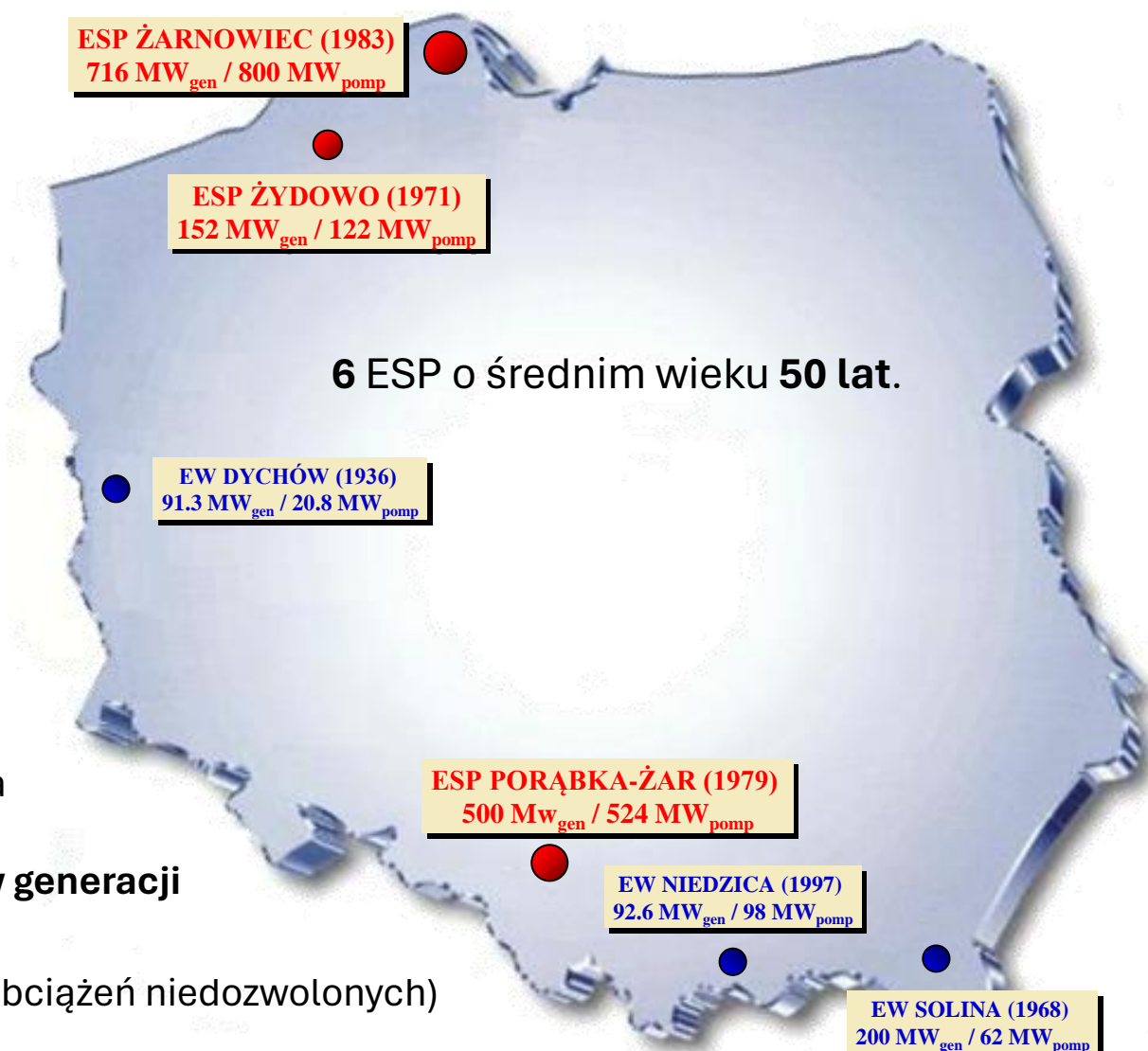
Elektrownie szczytowo-pompowe

Cele modernizacji zakończonych w pierwszej dekadzie XXI wieku (ESP Żarnowiec, EW Solina, EW Dychów, ESP Żydowo):

- podwyższanie **sprawności**,
- podwyższenie **mocy zainstalowanej**,
- podwyższenie **dyspozycyjności**,
- rozszerzenia wachlarza **usług systemowych** takich jak m.in.:
 - udział w odbudowie napięcia w systemie elektroenergetycznych tzw. usługa black – startu;
 - wdrożenie pracy kompensatorowej w turbinowym kierunku wirowania;
- poszerzenie obszaru **regulacji mocy czynnej w systemie pracy generatorowej**.

Największe efekty modernizacji:

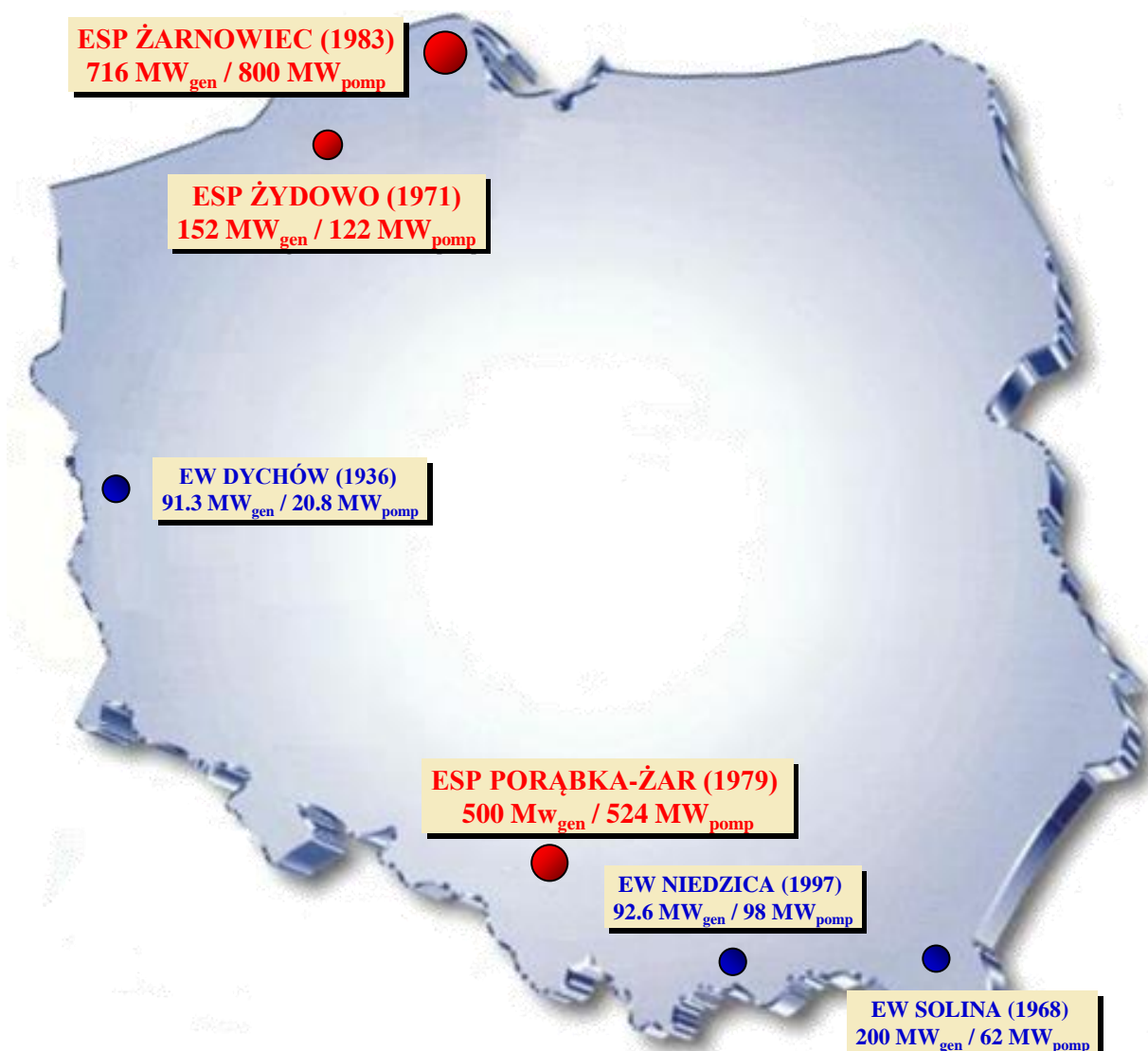
- **ESP Solina** (wymiana wirników oraz przewietrzanie komory wirnika w hydrozespołach klasycznych):
zwiększenie mocy inst. o ~47%, zwiększenie pasma regulacji w generacji
- **ESP Żarnowiec** (wymiana wirników)
zwiększenie pasma regulacji w generacji (eliminacja obszarów obciążeń niedozwolonych)



Elektrownie szczytowo-pompowe

Zagadnienia nie podjęte podczas realizowanych modernizacji:

- regulacja mocy czynnej w systemie pracy pompowej,
(**ESP Niedzica** z turbinami Deriaza z możliwością regulacji mocy czynnej zarówno generowanej jak i pobieranej z systemu – **elektrownia ta do tej pory (27 lat eksploatacji) nie jest wykorzystywana w systemie jako elektrownia szczytowo – pompowa !**)
- zwiększenie szybkości zmian obciążenia,
- zwiększenie szybkości uruchomień do pracy generacyjnej i pompowej,
- zwiększenie szybkości przejść pomiędzy systemami pracy hydrozespołów,
- zwiększenie pojemności magazynowej zbiorników elektrowni.



Przewietrzanie komory wirnika

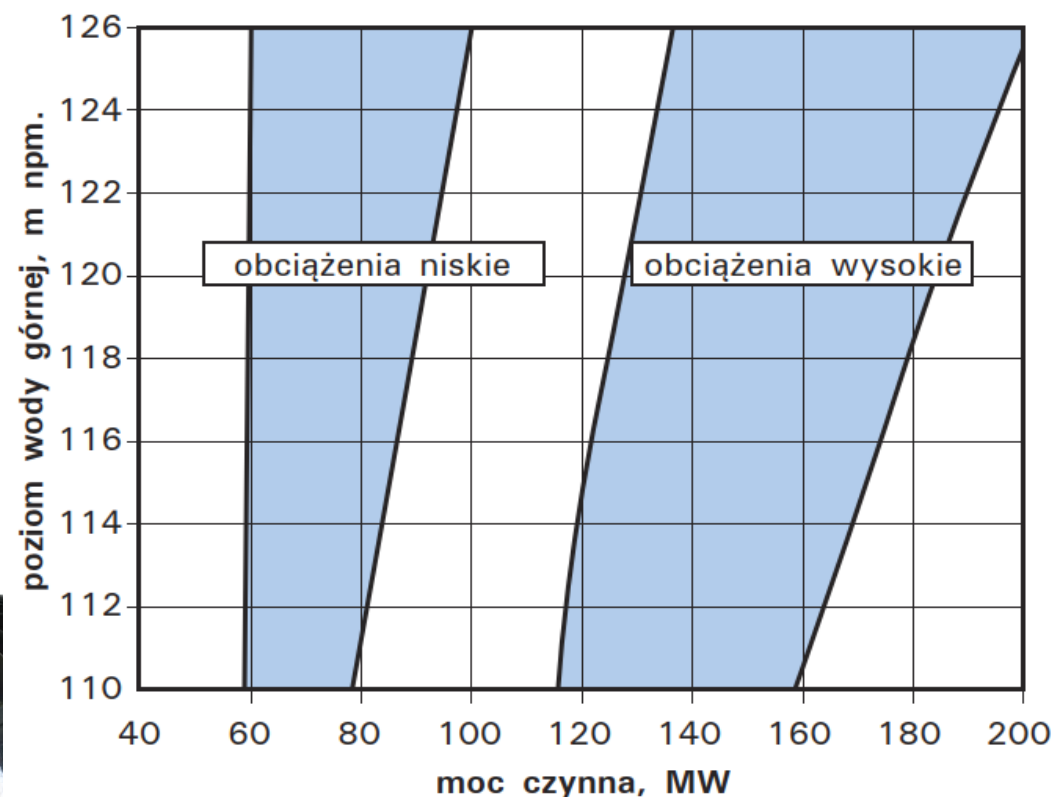
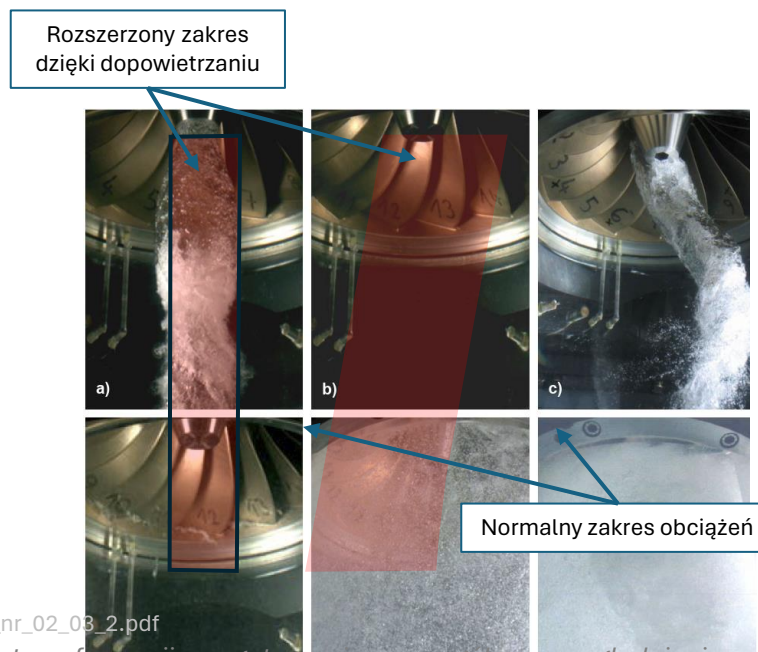
Doprowadzenie powietrza do komory wirnika w rejon tworzenia się wiru kawitacyjnego:

- obniżenie poziomu drgań podczas pracy generacyjnej hydrozespołu, przede wszystkim przy częściowym obciążeniu;
- ograniczenie zjawiska kawitacji oraz erozji powodującej degradację elementów turbiny (łopaty wirnika, opancerzenie rury ssącej);
- istotny jest wybór odpowiedniego miejsca, w którym powietrze jest wprowadzane do układu przepływowego oraz jego ilości.

Praktycznie nie ma technicznie akceptowalnych możliwości prowadzenia ruchu hydrozespołów wyposażonych w pompoturbiny z mocą bliską zero (moc okołozerowa)



ograniczenie mocy minimalnej na poziomie min. 5 do 10% mocy osiągalnej.



Rys. 2. Zakresy pracy hydrozespołów w EW Żarnowiec przed modernizacją

27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (IAHR 2014) IOP Publishing.
IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 22 (2014) 032054 doi:10.1088/1755-1315/22/3/032054

Układy zmiennoprędkościowe

Korzyści wprowadzenia zmiennej prędkości hydrozespołów odwracalnych:

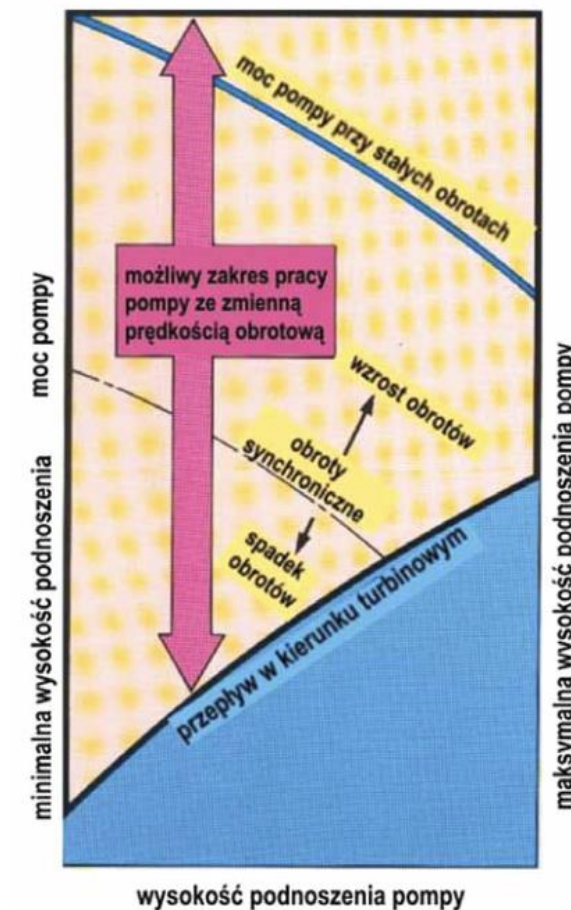
- zmienna moc i wydatek w trybie pracy pompowej,
- polepszenie sprawności hydraulicznej w trybie pracy generacyjnej,
- rozszerzenie zakresu pasma obciążenia w trybie generacyjnym,
- rozszerzenie zakresu zmienności spadu w trybie generacyjnym,
-
- zwiększenie zdolności maszyny do przystosowania się do większych odchyłek częstotliwości systemu w trybie pompowym,
- szybka reakcja mocy czynnej (przy zmianie mocy generator dostosowuje swą moc momentalnie, podczas gdy reakcja łopatek kierowniczych jest powolna),

.....

➡ **polepszenie stabilności pracy systemu el.en.**

Rozwiązanie wymaga znacznych nakładów inwestycyjnych.

Korzyści większe dla jednostek dużych mocy pracujących przy znacznych wahaniach spadu.

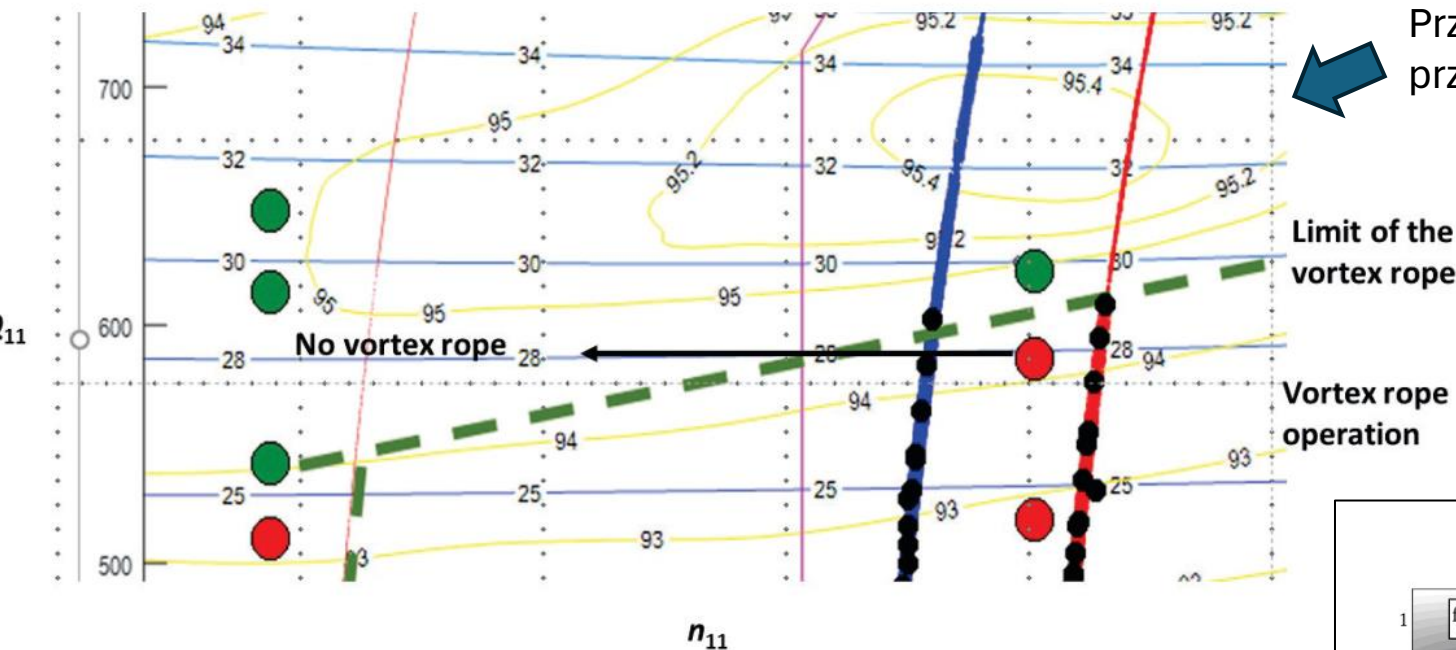


Rys. 4. ESP Yagisawa. Rozszerzenie obszaru obciążeń hydrozespołu odwracalnego ze zmienną prędkością obrotową w pracy pompowej

Źródło: Toshiba Corp.

https://nis.com.pl/userfiles/editor/nauka/062021_n/Steller.pdf

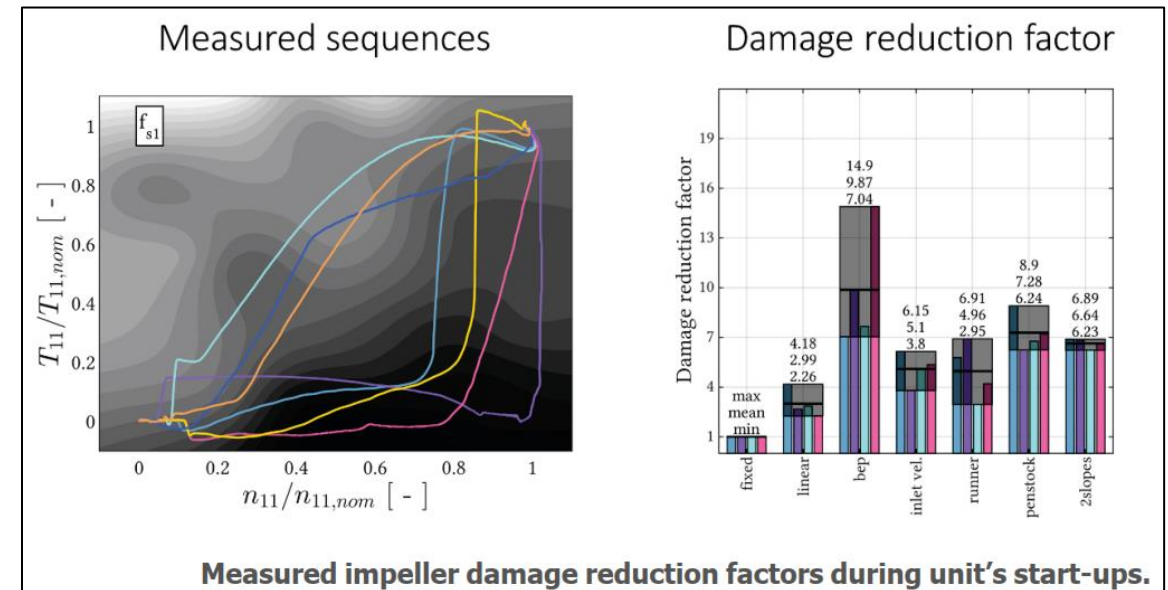
Układy zmiennoprędkościowe



XFLEX HYDRO

Możliwość zmniejszenia niszczących obciążeń dynamicznych układów hydraulicznych na przykładzie zoptymalizowania realizacji uruchamiania i obciążania hydrozespołu do zadanej mocy

Źródło: XFLEX Hydro



Zwarcie hydrauliczne

Jednoczesna praca pompowa i generacyjna.

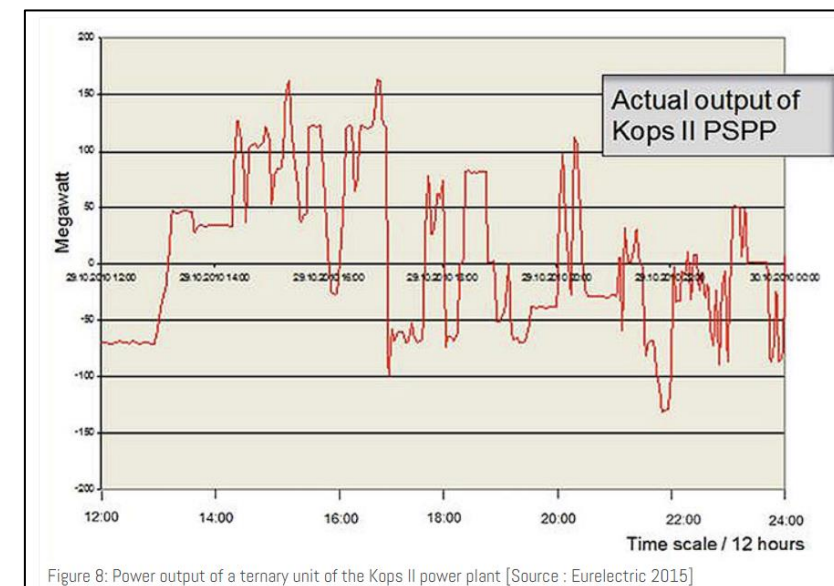
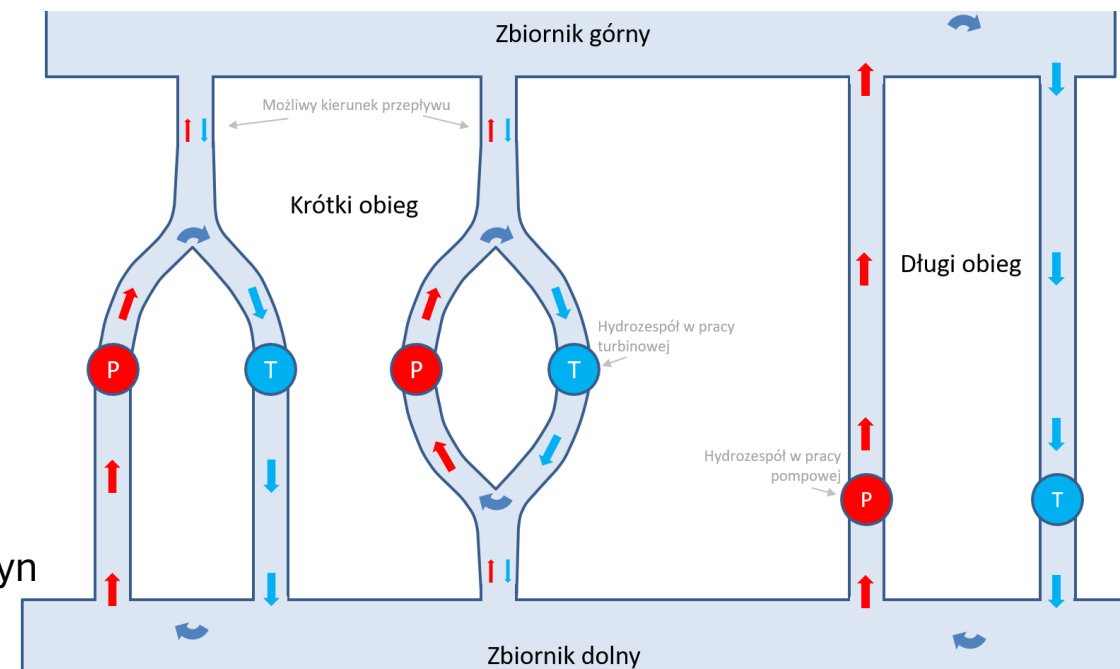
Pierwsze zastosowania dla hydrozespołów trójmaszynowych (Geesthacht, Niemcy)

Korzyści:

- Znaczące rozszerzenie obszaru obciążenia elektrowni;
- Możliwość prowadzenia pracy z mocą okołozerową;
- Ograniczenie zatrzymań/uruchomień \Rightarrow zmniejszenie obciążeń maszyn
- Relatywnie niski nakład związany głównie z badaniami możliwości wprowadzenia systemu pracy w zwarcu hydraulicznym

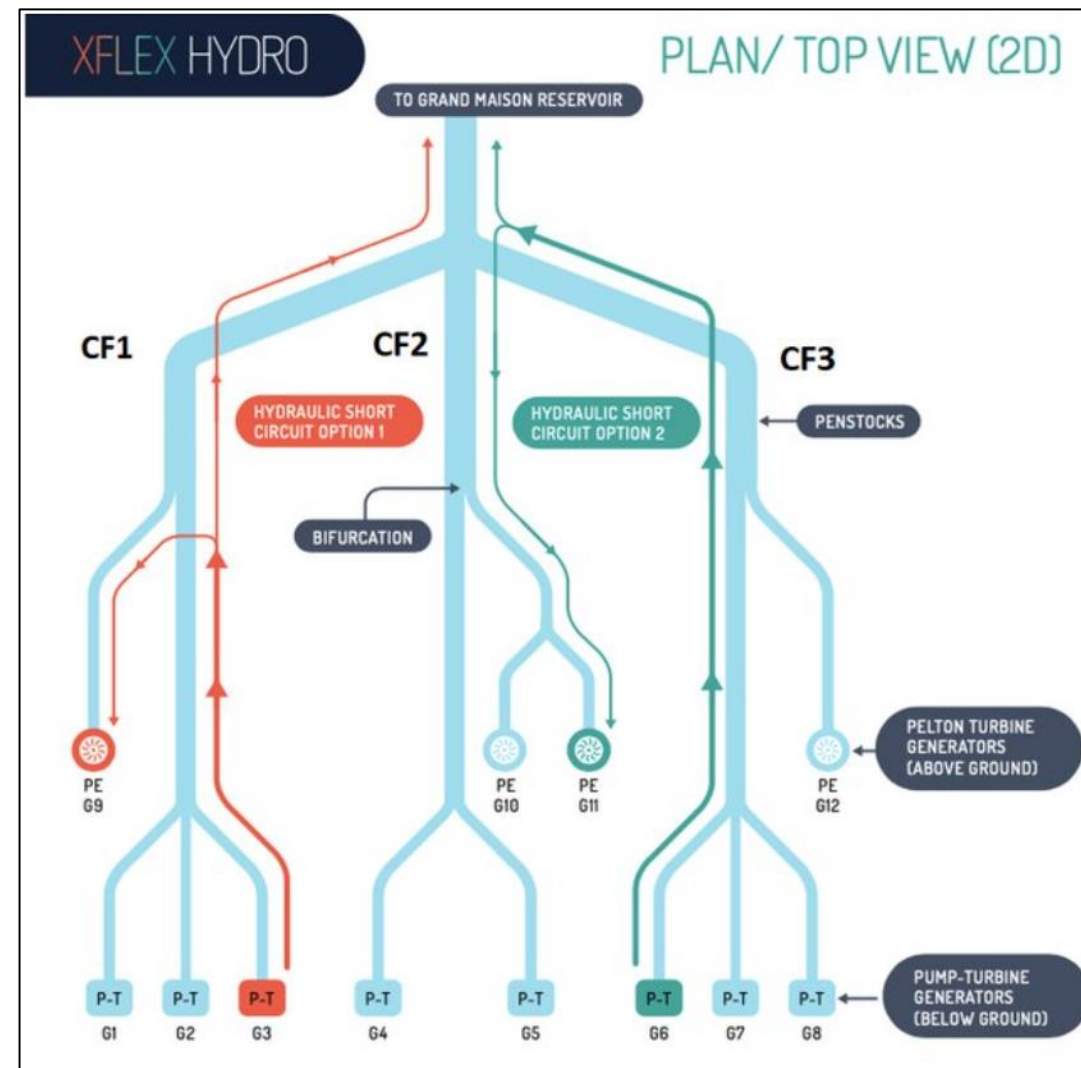
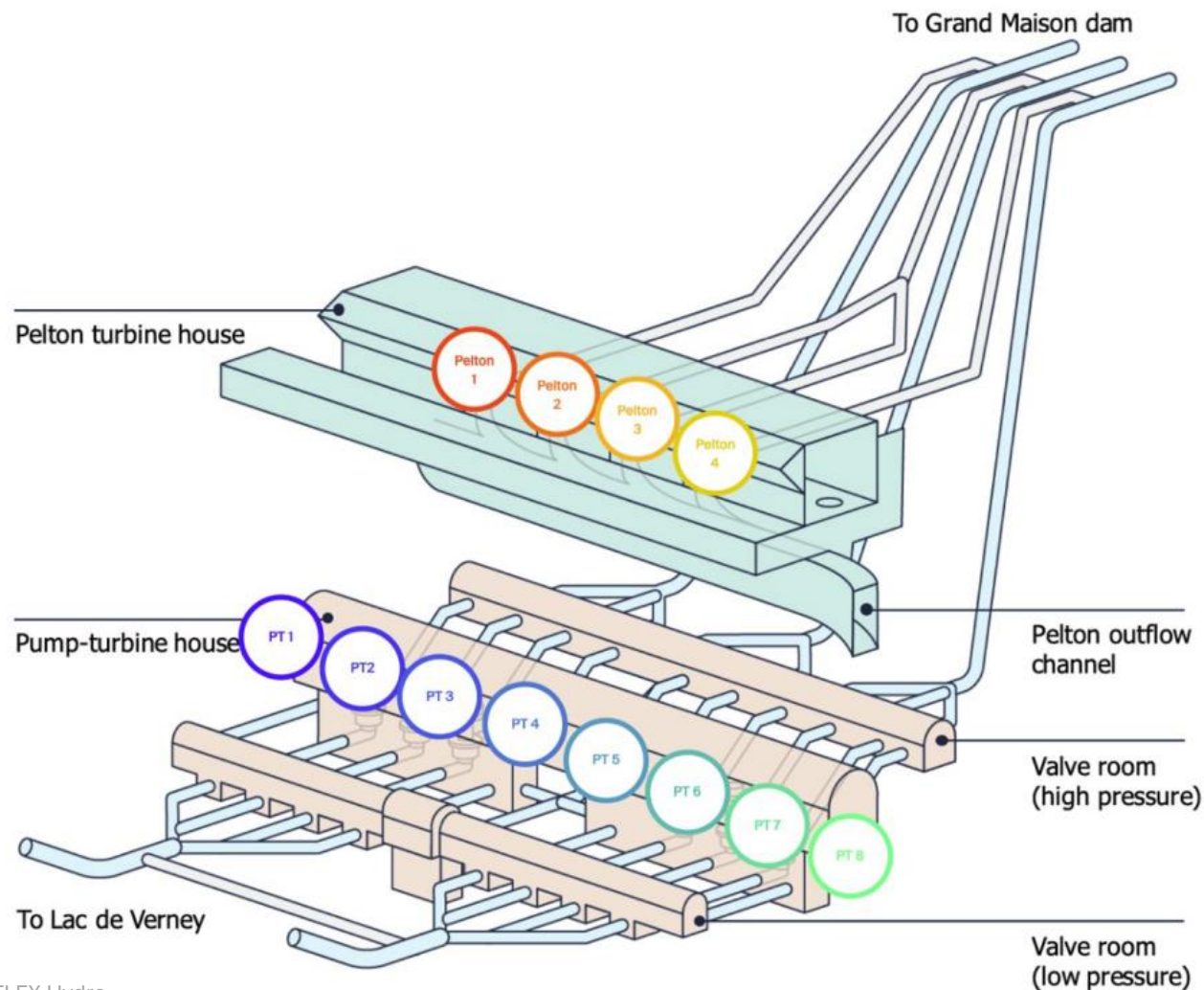
Wymóg zapewnienia bezpieczeństwa pracy elektrowni:

- Praca w warunkach nie przewidzianych w pierwotnym projekcie elektrowni
- Trudny do przewidzenia stan dynamiczny w układach rozgałęzień derywacji
- Badania numeryczne zjawisk przepływowych i wyężenia konstrukcji
- Badania obiektowe stanu drganiowego, pulsacji ciśnień, stanu naprężeń konstrukcji
- Pomiary zarówno w stanach ustalonej pracy oraz podczas zmian obciążenia, uruchomień maszyn w różnych konfiguracjach, zatrzymań w tym jednoczesnych zatrzymań awaryjnych, itd..



Zwarcie hydrauliczne

Grand' Maison – 1.8 GW, 8 turbin odwracalnych Francisa, 4 turbiny Peltona



Źródło: XFLEX Hydro

Zwarcie hydrauliczne

Szacowane możliwości zwiększenia zakresu regulacji obciążenia ESP pracujących w systemie zwarcia hydraulicznego

ponad 900 MW

Największy potencjał:

- ESP Żarnowiec o ~440 MW (o 76%)
- ESP Żar o ~300 MW (o 79%)

Problem regulacji z mocą okołozerową

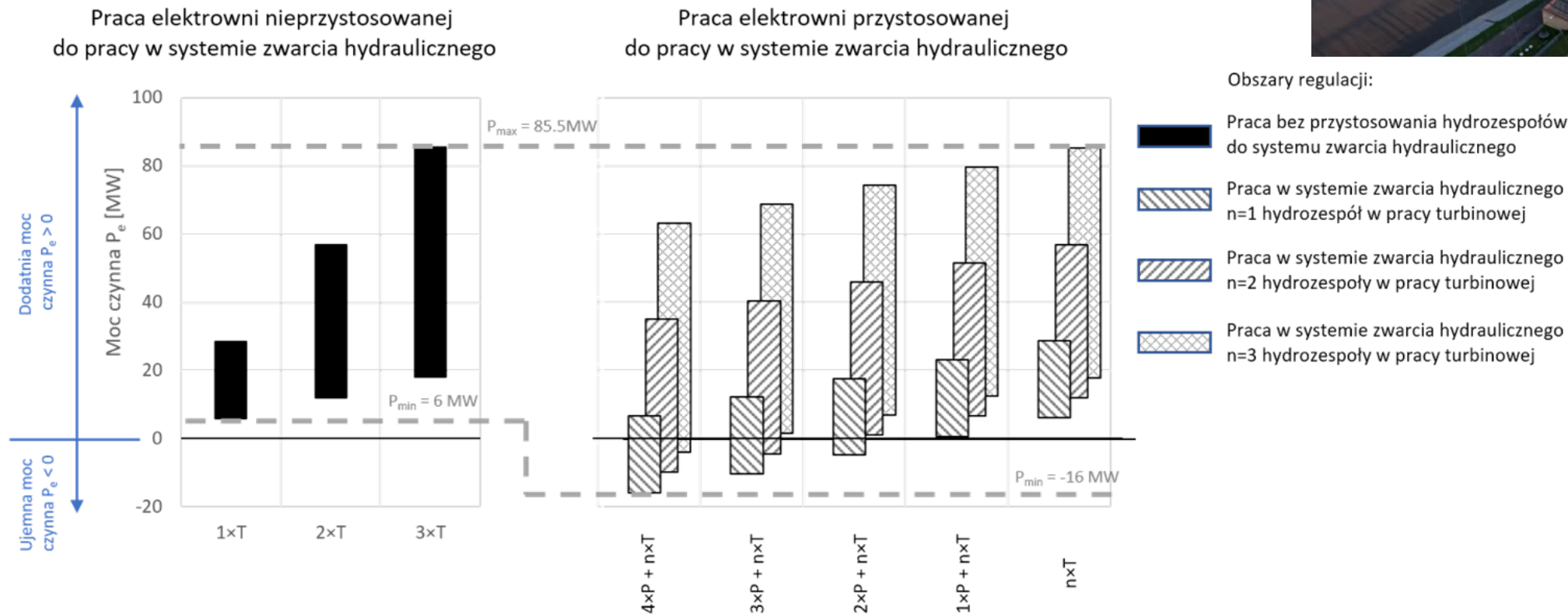
Wady:

- utrata sprawności

| | SCHEMAT UKŁADU PRZEPŁYWOWEGO | ZAKRES REGULACJI MOCY W KLASYCZNYM SYSTEMIE PRACY | ZAKRES REGULACJI MOCY W SYSTEMIE ZWARCIA HYDRAULICZNEGO | OBSZAR CIĄGŁEJ I BEZPRZERWOWEJ REGULACJI MOCY CZYNNEJ |
|---------------|------------------------------|--|--|--|
| ESP DYCHÓW | | $P_{min} = +6,0 \text{ MW}$ (1×T z mocą min) $P_{max} = +85,5 \text{ MW}$ (3×T z mocą max) Zakres regulacji $\Delta P = 79,5 \text{ MW}$ ciągły obszar regulacji | $P_{min} = -16,0 \text{ MW}$ (4×P + 1×T z mocą min) $P_{max} = +85,5 \text{ MW}$ (3×T z mocą max) Zakres regulacji $\Delta P = 101,5 \text{ MW}$ ciągły obszar regulacji | System klasyczny: $\Delta P_{reg,A} = 79,5 \text{ MW}$ Zwarcie hydrauliczne: $\Delta P_{reg,A} = 101,5 \text{ MW}$ Zwiększenie zakresu regulacji o: +22 MW; 28% |
| ESP ŻAR | | $P_{min} = +80,0 \text{ MW}$ (1×T z mocą min) $P_{max} = +500,0 \text{ MW}$ (4×T z mocą max) Zakres regulacji $\Delta P = 420 \text{ MW}$ z wyłączeniem obszarów: (+125 ÷ +160 MW) $\Delta P = 35 \text{ MW}$ | $P_{min} = -325,0 \text{ MW}$ (3×P + 1×T z mocą min) $P_{max} = +500,0 \text{ MW}$ (4×T z mocą max) Zakres regulacji $\Delta P = 825 \text{ MW}$ z wyłączeniem obszarów: (-280 ÷ -190 MW) $\Delta P = 90 \text{ MW}$ (-145 ÷ -135 MW) $\Delta P = 10 \text{ MW}$ -10 ÷ +25 MW) $\Delta P = 35 \text{ MW}$ | System klasyczny: $\Delta P_{reg,A} = 385 \text{ MW}$ Zwarcie hydrauliczne: $\Delta P_{reg,A} = 690 \text{ MW}$ Zwiększenie zakresu regulacji o: +305 MW; 79% |
| ESP ŻARNOWIEC | | $P_{min} = +107,0 \text{ MW}$ (1×T z mocą min) $P_{max} = +716,0 \text{ MW}$ (4×T z mocą max) Zakres regulacji $\Delta P = 609 \text{ MW}$ z wyłączeniem obszaru: (+179 ÷ +214 MW) $\Delta P = 35 \text{ MW}$ | $P_{min} = -493,0 \text{ MW}$ (3×P + 1×T z mocą min) $P_{max} = +716,0 \text{ MW}$ (4×T z mocą max) Zakres regulacji $\Delta P = 1'209 \text{ MW}$ z wyłączeniem obszarów: (-421 ÷ -293 MW) $\Delta P = 128 \text{ MW}$ (-221 ÷ -186 MW) $\Delta P = 35 \text{ MW}$ -21 ÷ +14 MW) $\Delta P = 35 \text{ MW}$ | System klasyczny: $\Delta P_{reg,A} = 574 \text{ MW}$ Zwarcie hydrauliczne: $\Delta P_{reg,A} = 1'011 \text{ MW}$ Zwiększenie zakresu regulacji o: +437 MW; 76% |
| ESP NIEDZICA | | $P_{min} = -98,0 \text{ MW}$ (1×P z mocą min) $P_{max} = +98,0 \text{ MW}$ (2×T z mocą max) Zakres regulacji $\Delta P = 196 \text{ MW}$ z wyłączeniem obszarów: (-74 ÷ -49 MW) $\Delta P = 25 \text{ MW}$ (-37 ÷ +5 MW) $\Delta P = 42 \text{ MW}$ | $P_{min} = -98,0 \text{ MW}$ (2×P z mocą min) $P_{max} = +98,0 \text{ MW}$ (2×T z mocą max) Zakres regulacji $\Delta P = 196 \text{ MW}$ z wyłączeniem obszaru: (-74 ÷ -49 MW) $\Delta P = 25 \text{ MW}$ | System klasyczny: $\Delta P_{reg,A} = 129 \text{ MW}$ Zwarcie hydrauliczne: $\Delta P_{reg,A} = 171 \text{ MW}$ Zwiększenie zakresu regulacji o: +42 MW; 33% |

Zwarcie hydrauliczne

ESP Dychów – $\sim 85 \text{ MW}_{\text{turb}}$, $22 \text{ MW}_{\text{pomp}}$, 3 turbiny Kaplana, 4 agregaty pompowe



Podsumowanie

1. Wykorzystanie istniejących możliwości magazynowych EWoZ powyżej 5 MW (teoretyczne szacowane na ponad 83 GWh) wymaga zniesienia barier formalnych narzuconych na pierwotne regulacje, według których EWoZ były projektowane oraz wypracowania odpowiednich modeli współpracy z innymi użytkownikami zbiorników.
2. Doposażanie EWoZ w człony pompowe: sposób na znaczące zwiększenie zakresu obciążeń elektrowni z możliwością ograniczenia wpływu regulacyjnej pracy zespołów hydroenergetycznych na zmienność przepływu wody w cieku poniżej elektrowni.
3. Hybrydyzacja EWoZ: zwiększenie mocy instalowanej i dodatkowo:
 - a. BESS – zwiększenie sumarycznej pojemności magazynowej, zagwarantowanie szybszych odpowiedzi na zmiany częstotliwości w systemie, zwiększenie żywotności hydrozespołów;
 - b. PV na zbiornikach i/lub EWi + cable pooling – połączenie z EWoZ umożliwi bezpośrednie bilansowanie całego (hybrydowego) źródła wytwarzania.
4. Eksploatowane w Polsce ESP mają ogromny potencjał zwiększania elastyczności ich pracy. Rozszerzenie zakresu regulacyjności można osiągnąć przy wykorzystaniu istniejących światowych doświadczeń natury technicznej i organizacyjnej (przewietrzanie komory wirnika, układy zmiennoprędkościowe, zwarcie hydrauliczne, optymalizacja grupowa pracy hydrozespołów w elektrowni). Impuls do inwestycji w tym zakresie może dać odpowiedni system rozliczeń usług elastyczności lub systemy wsparcia.
5. Poprawa elastyczności pracy systemu elektroenergetycznego kluczowa w powodzeniu transformacji energetycznej. Udział energetyki wodnej w tych działaniach jest niekwestionowana potrzebą.



<https://www.xflexhydro.com/>



<https://www.hydropower.org/>

Dziękuję za uwagę !

Mariusz Lewandowski

mlew@imp.gda.pl

Maciej Kaniecki

maciejk@thordonbearings.com

Stanisław Lewandowski

easy SERV.spk@gmail.com

