



Mogućnosti sudjelovanja elektrolizatora u pružanju pomoćnih usluga

prof. Damir Jakus



SADRŽAJ PREZENTACIJE

Osnovne karakteristike elektrolizatorskih postrojenja

Mogućnosti sudjelovanja elektrolizatora u pružanju pomoćnih usluga

Metodologija za izračun isplativosti ulaganja te sudjelovanje elektrolizatorskih postrojenja na tržištima energije i uravnoteženja

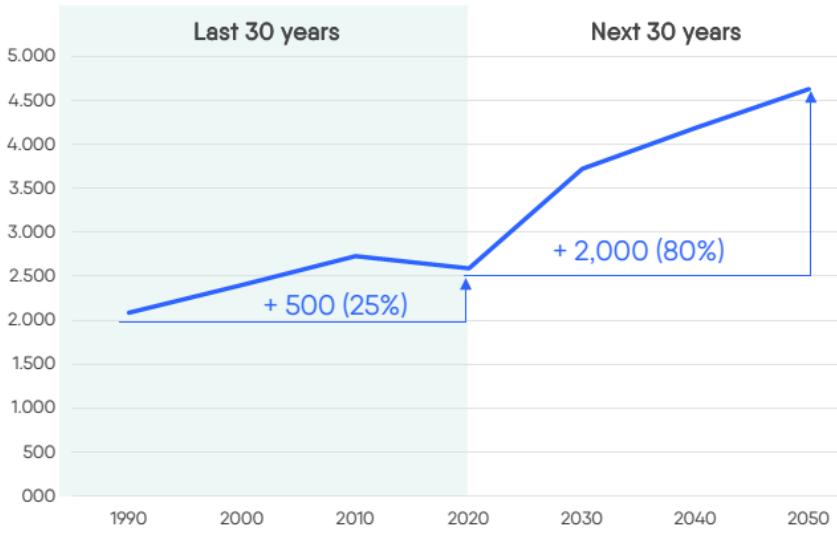
Rezultati proračuna

Zaključci



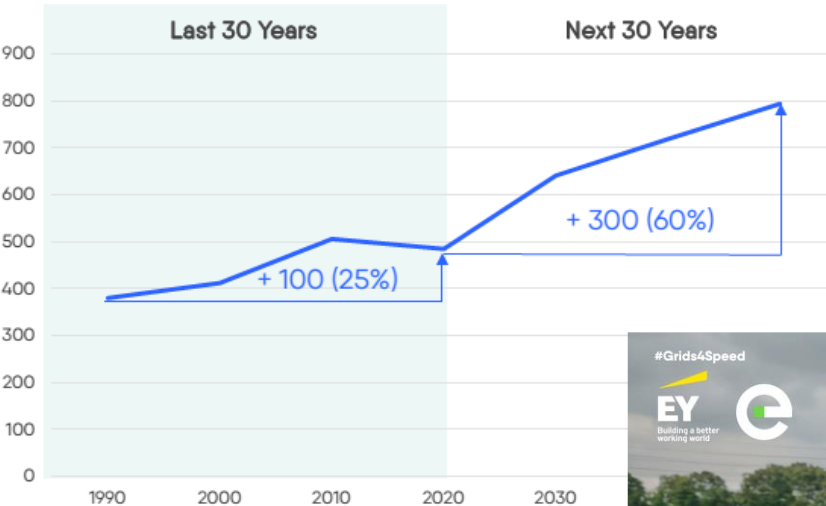
Electricity consumption (TWh)

Rising consumption in the EU27+Norway



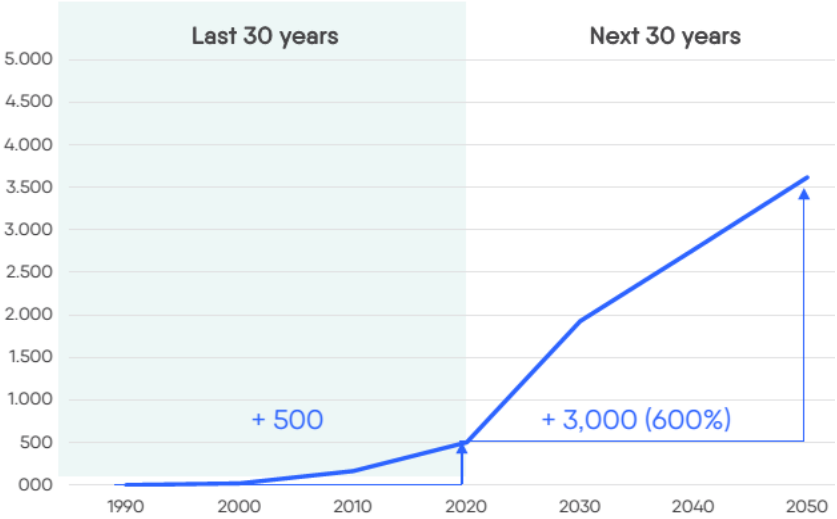
Peak demand (GW)

Changing peak load in the EU27+Norway



Renewables production (TWh)

How onshore wind and solar PV will impact distribution grids in the EU27+Norway

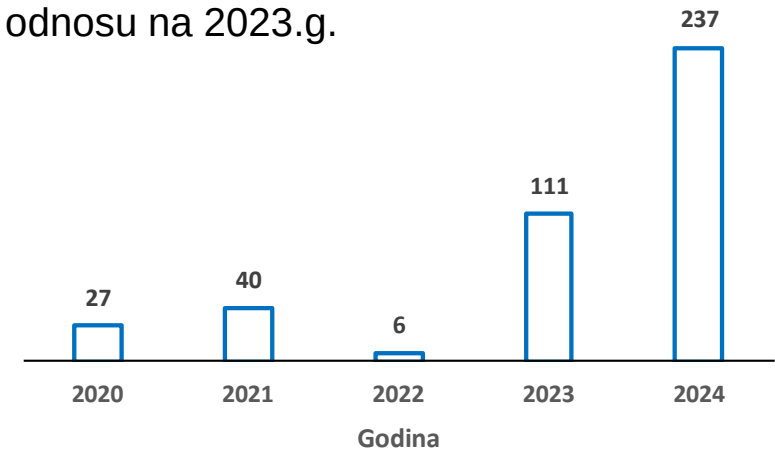


EUR 4.2 bn Cost of managing grid congestion in the EU in 2023 	<100 MW Average capacities available at the start of cross-border intraday trading in the Core region 	30-70% Range of average margins of capacity made available for trade in the day-ahead market 	10 TWh Renewables curtailed in Germany due to congestion, 4% of its total renewable generation
---	--	--	--

UVOD

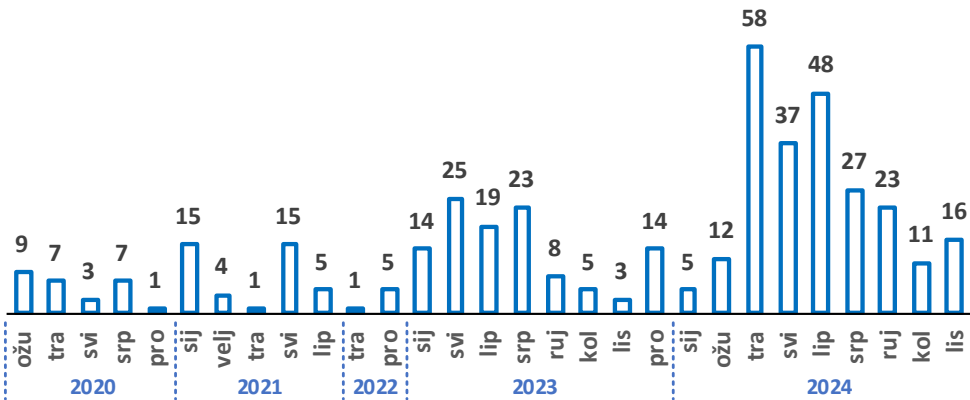
Broj sati s cijenama ≤ 0 €/MWh

U prvih 10 mj. 2024 porast od 113% u odnosu na 2023.g.



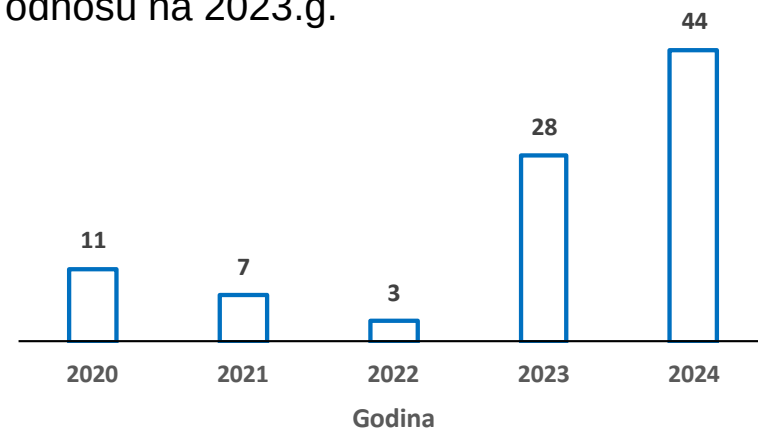
Broj sati s cijenama ≤ 0 €/MWh

Rekorderi u 2024.g. : travanj: 58h, lipanj: 48h



Broj dana s cijenama ≤ 0 €/MWh

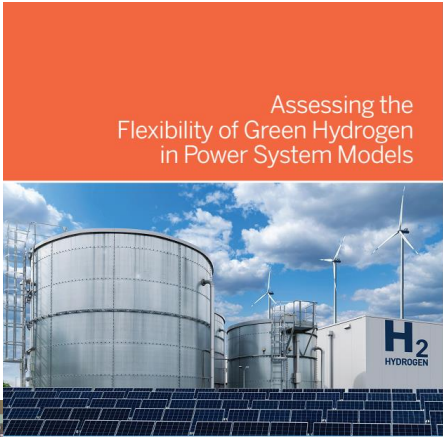
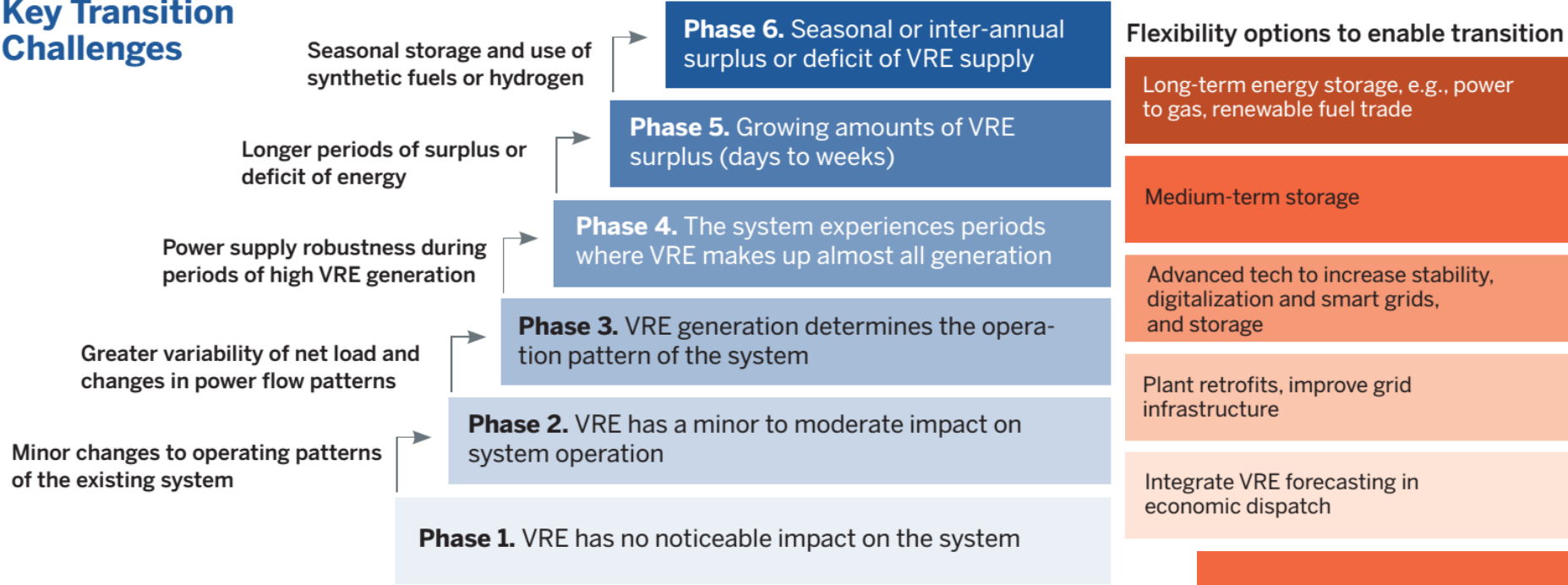
U prvih 10 mj. 2024. porast od 57% u odnosu na 2023.g.



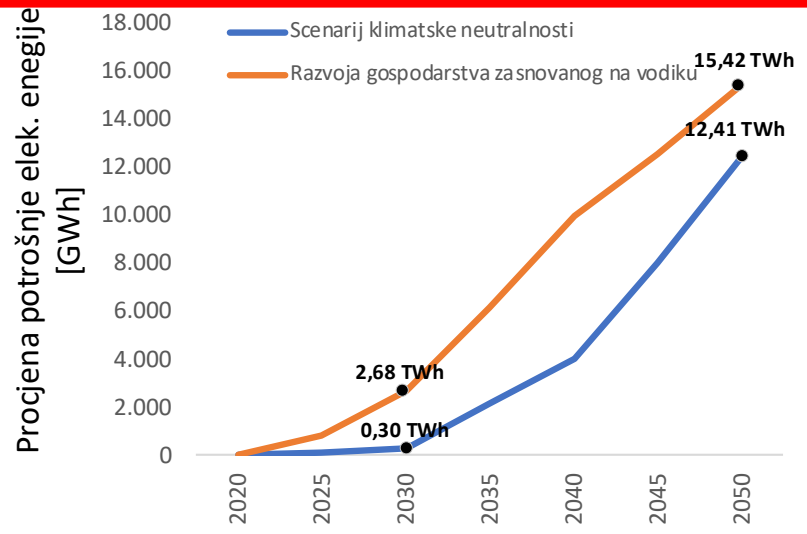
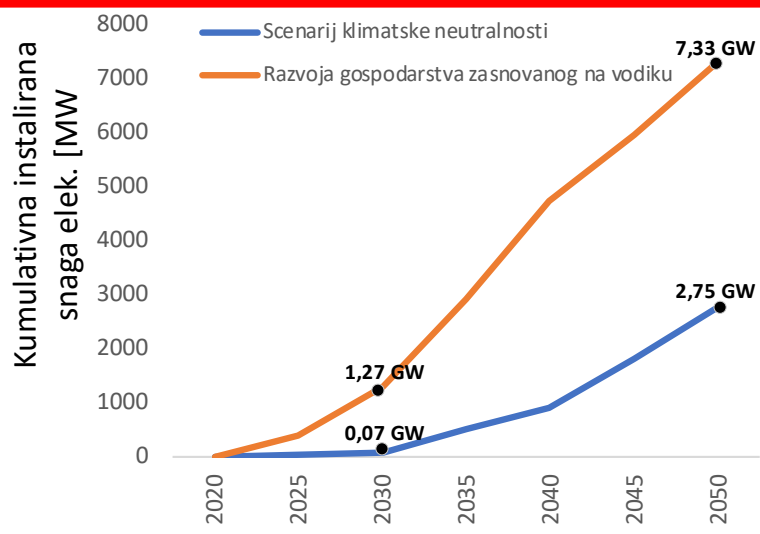
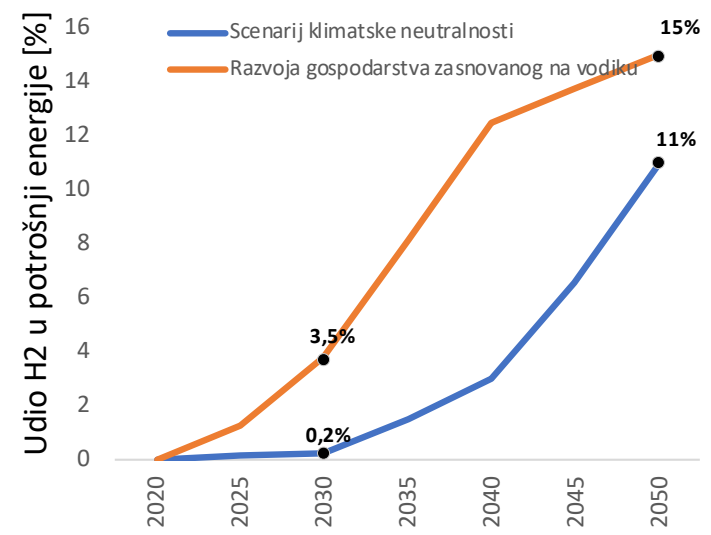
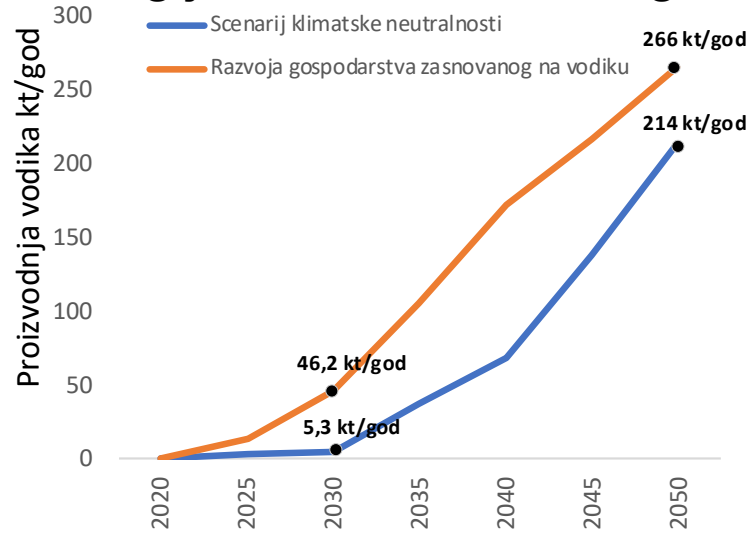
Cijene s DA tržišta na dane s najvećim brojem sati s cijenama ≤ 0 €/MWh



Key Transition Challenges



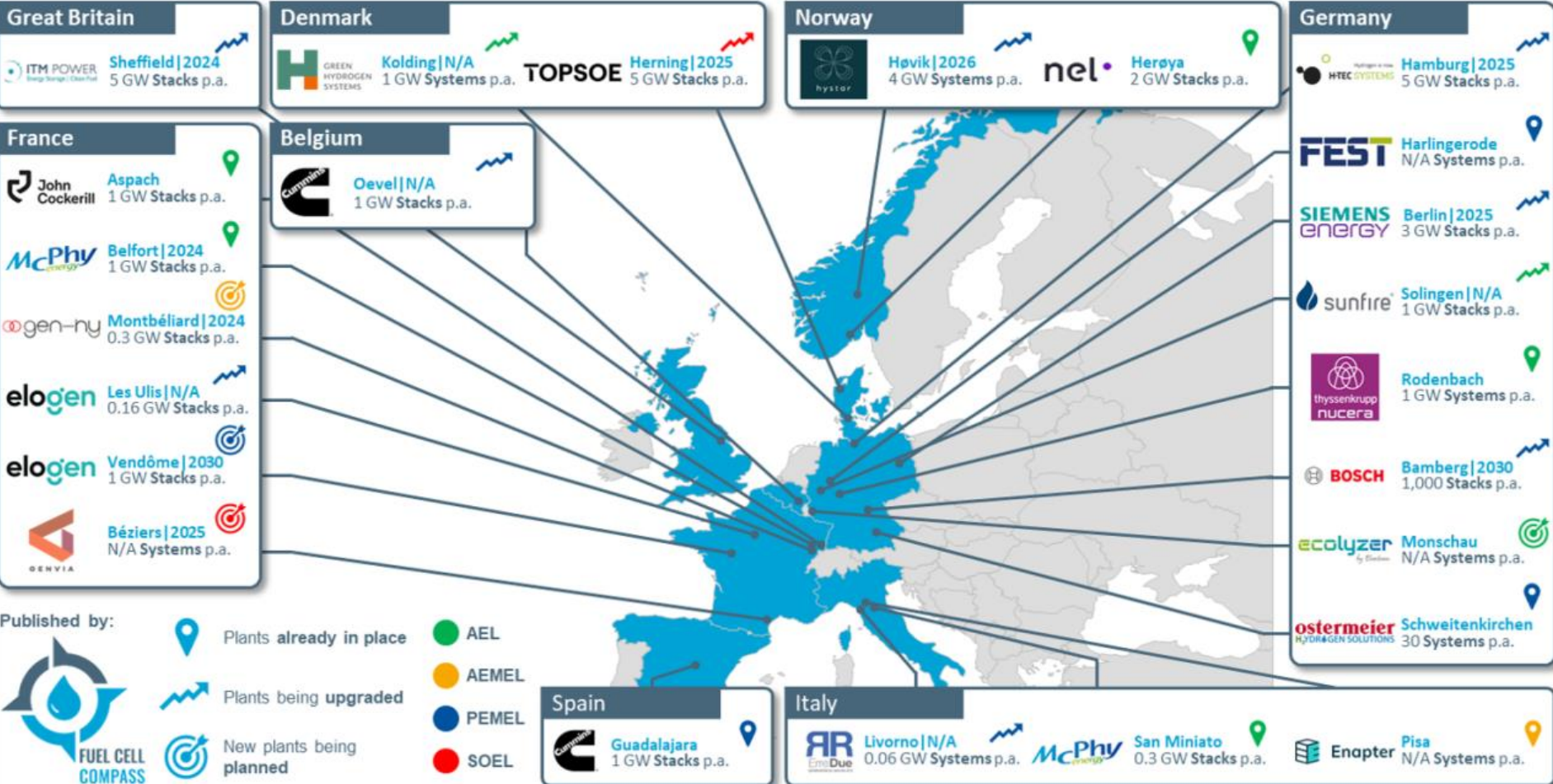
Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine



fakt.ang. elektrolizatora 24.2%
fakt.ang. elektrolizatora 50%

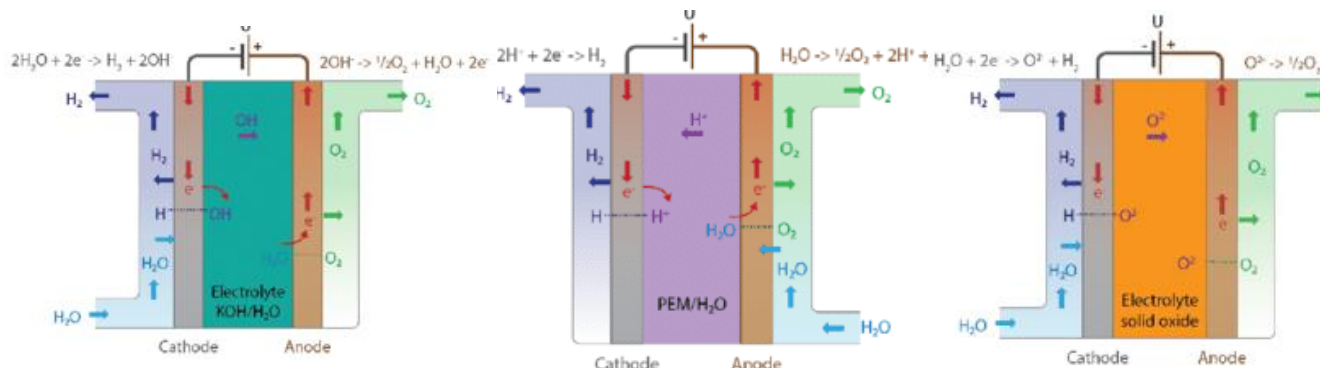
Učinci na elektroenergetski sustav

UVOD



Osnovne karakteristike elektrolizatorskih postrojenja

OSNOVNE KARAKTERISTIKE RAZLIČITIH IZVEDBI



			AE		PEM		SOEC	
			2020	2030	2020	2030	2020	2030
Općenite značajke	Zrelost tehnologije	Zrelost	Zrela		Komercijalna		U razvoju	
	Tipična veličina elektrane	kg/dan	do 70.000		do 50.000		manji pilot projekti	
	Potrebna površina	m ² /kWe	0,095		0,048		nema dostupnih info.	
	Čistoća vodika	%	99.7-99.9		99.9-99.9999		>99%	
Fleksibilnost pogona	Brzina startanja	minuta	do 10min		5sek do 1 min		dugo	
	Brzina promjena snage	%/sec	0.2 do 20		100		sporo	
	Brzina zaustavljanja	minuta	do 10		nekoliko sek.		dugo	
	Raspon opterećenja	%	10 - 110		0 - 160		20 - 100	
	Pogonski tlak	bar	1 - 30		3 - 80		1	
	Pogonska temperatura	°C	60 - 80		50 - 80		650 - 1000	
	Reverzni mod	DA/NE	NE		NE		DA	
Životni vijek	Cijela elektrana	god	20		20		20	
	Stack	sati	75.000	95.000	60.000	75.000	25.000	60.000
Efikasnost pretvorbe	Potrošnja energije	kWh/kgH ₂	48 - 53	47 - 51	56 - 60	49 - 53	40 - 45	37 - 43
	Degradacija	%/1000h	0,1	0,1	0,2	0,1	1,9	0,5
CAPEX	Cijela elektrana	€/kW	750 - 1400	400 - 900	800 - 1800	600 - 1400	800 - 2300	500 - 1400
	Stack	% ukupnih troš.	35	30	35	30	50	40
OPEX	Udio % CAPEX	%	2 - 4%		2 - 4%		5 - 7%	

Osnovne karakteristike elektrolizatorskih postrojenja

Investicijski troškovi elektrolizatora - CAPEX



Alkalijski **PEM** **SOEC** **AEM**

Zbog rane faze razvoja SOEC i AEM elektrolizatora, njihovi troškovi mogli bi ostati visoki u doglednoj budućnosti i ostati vrlo neizvjesni. Kapitalni troškovi za AEM elektrolizu nisu dostupni.

- zelena boja** – manji troškovi
- narančasta boja** – veći troškovi
- siva boja** – nema dovoljno info.

Raspon rada i dinamička svojstva elektrolizatora



Alkalijski **PEM** **SOEC** **AEM**

Od četiri glavna tipa elektrolizatora, alkalni sustavi imaju najsuženiji radni raspon. Ostale tri tehnologije pružaju širok radni raspon koji može biti koristan za pružanje operativne fleksibilnosti.

- zelena boja** – širi raspon rada
- narančasta boja** – uži raspon rada

Brzina odziva elektrolizatora

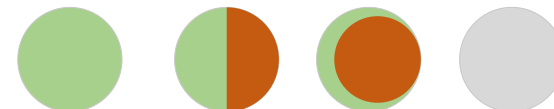


Alkalijski **PEM** **SOEC** **AEM**

Brza brzina odziva AEM i PEM elektrolizatora čini ih idealnima za pružanje usluga fleksibilnosti sustava.

- zelena boja** – brži odziv
- narančasta boja** – sporiji odziv

Životni vijek elektrolizatora

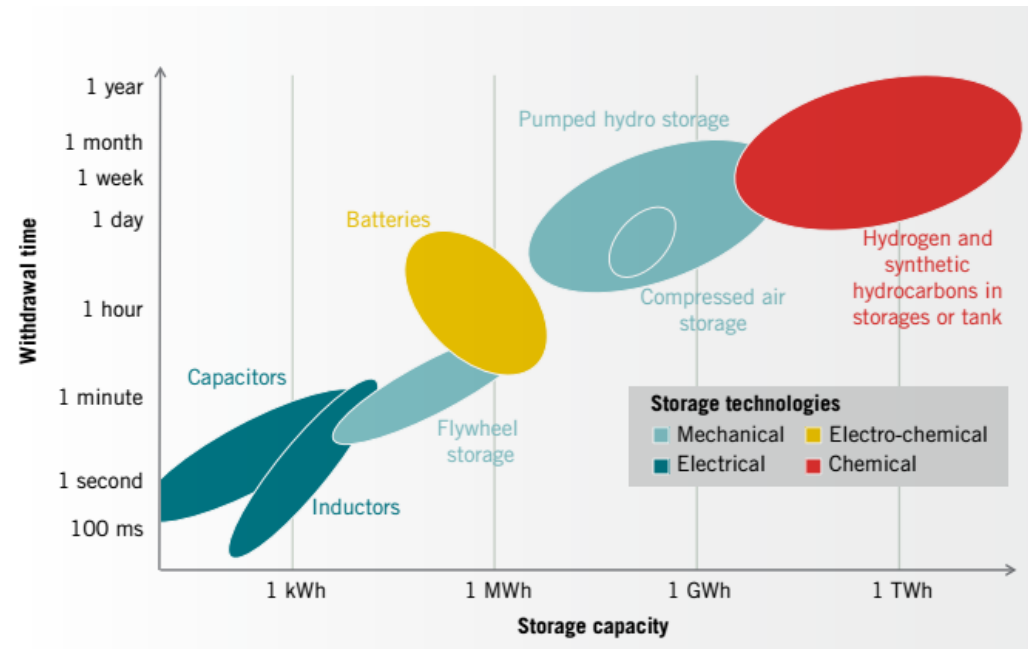


Alkalijski **PEM** **SOEC** **AEM**

Alkalijski elektrolizatori imaju najduži životni vijek i postoji mogućnost obnove svežnja umjesto kompletne zamjene. Upotreba keramičkih materijala u SOEC elektrolizatorima smanjuje životni vijek.

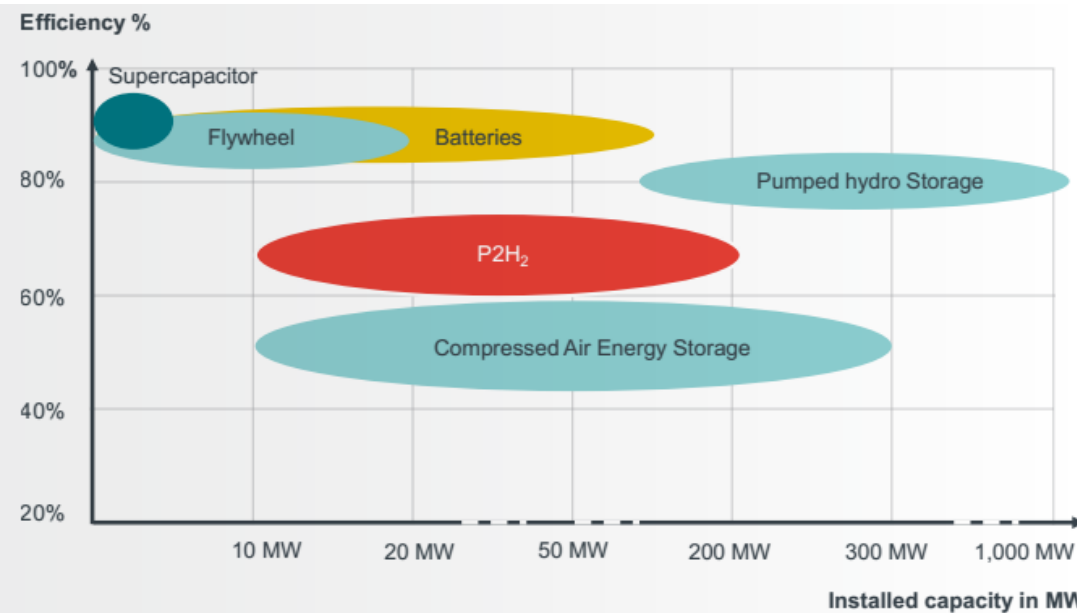
- zelena boja** – duži životni vijek
- narančasta boja** – kraći životni vijek
- siva boja** – nema dovoljno info.

Osnovne karakteristike elektrolizatorskih postrojenja



RASPON KAPACITETA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA SKLADIŠTENJA

EFIKASNOST I PROSJEČNA INSTALIRANA SNAGA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA

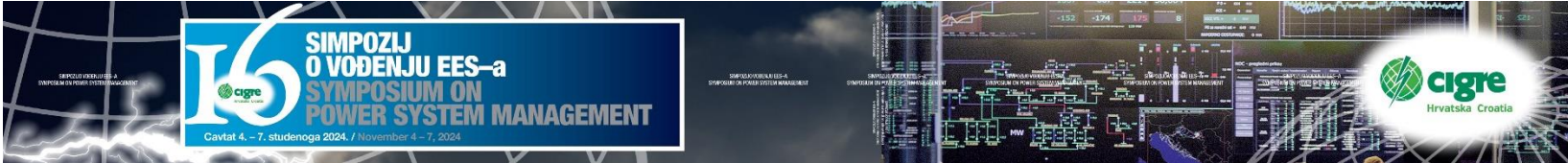


Osnovne karakteristike elektrolizatorskih postrojenja

Options for stabilizing RES system	Suitability			Assessment	Suitability for long-term storage?
	Intra-day	Intra-month	Seasonal		
Over-supply	Reduce supply	Shut down RES		- Technically feasible - Inefficient, losses of investment	✗
	Sector coupling	Power-to-material (P2M)		- No reconversion to power possible - In R&D stage	✗
		Power-to-gas (P2G)		- Technically feasible in number of use cases - Currently high investment cost	✓
		Power-to-heat		- Efficient, discharge only to heat (not power) possible - Suitable for short-term balancing only	
		Power-to-gas-to-power (P2G2P)		- Reconversion possible - Low full cycle efficiency - Only if P2G not suitable/sufficient	✓
Under-supply	Store and discharge	Bat-tery	Compressed air, flywheel	- Technically feasible - Only short-term supply economically viable	✗
		Pumped hydro	Hydro reservoir (Scandinavia; Alps; ...) incl. interconnectors	Limited storage capacity due to natural limitations	✗
	Reduce demand ¹	Demand side management (DSM)		Consumption pattern only allows for limited shift within day	✗
	Increase supply	Structural renewables oversupply		- Technically feasible - Highly inefficient and capital intensive, losses of investment	✗
		Conventional backup (e.g., gas plants)		Feasible if power generation is decarbonized (e.g., pre-combustion CCS)	

1 Demand reduction/demand balancing beyond expected structural demand reduction and efficiency gains (e.g., via energy-efficient renovations of buildings)

Izvor: [Hydrogen Roadmap Europe](#)



Mogućnosti pružanja pomoćnih usluga

	Vrijeme do pune aktivacije	Minimalna snaga	Simetričnost ponude
Rezerva za održavanje frekvencije (FCR)	30 sekunda	1 MW	DA
Rezerva za ponovnu uspostavu frekvencije s automatskom aktivacijom (aFRR)	5 minuta	3 MW	NE
Rezerva za ponovnu uspostavu frekvencije s ručnom aktivacijom (mFRR)	15 minuta	3 MW	NE
Regulacija napona i jalove snage	Nekoliko sekundi do 15 minuta	N/A	NE
Komenzacijski rad za potrebe regulacije napona i jalove snage			
Crni start			
Rad u otočnom pogonu			
Upravljanje zagušenjima	Do 15 minuta	N/A	NE



HOPS – potrebe pomoćnih usluga/cijene pomoćnih usluga

Pomoćne usluge	Način nabavke	Količine		Cijene	
			j.m.		j.m.
FCR	Obavezna	17	MW	bez naknade	
aFRR za povećanje (58 MW)	HEP	513,360	MW	20,21	€/MW
aFRR za smanjenje (58 MW)	HEP	513,360	MW	23,41	€/MW
mFRR uravnoteženje za povećanje (100 MW)	Uglavnom HEP	878,400	MW	8,85	€/MW
mFRR uravnoteženje za smanjenje (120 MW)	Uglavnom HEP	1.054.080	MW	8,16	€/MW
mFRR za sigurnost (130 MW)	Otvoreno	1.141.920	MW	6,55	€/MW
RHE Velebit kompenzacijski rad	HEP	5,479	h	1.212,50	€/h
Crni start	HEP	8,784	h	37,05	€/h
Otočni pogon	HEP	8,784	h	107,51	€/h
Regulacija napona i jalove snage					
Fleksibilnost za upravljanje zagusenjima					

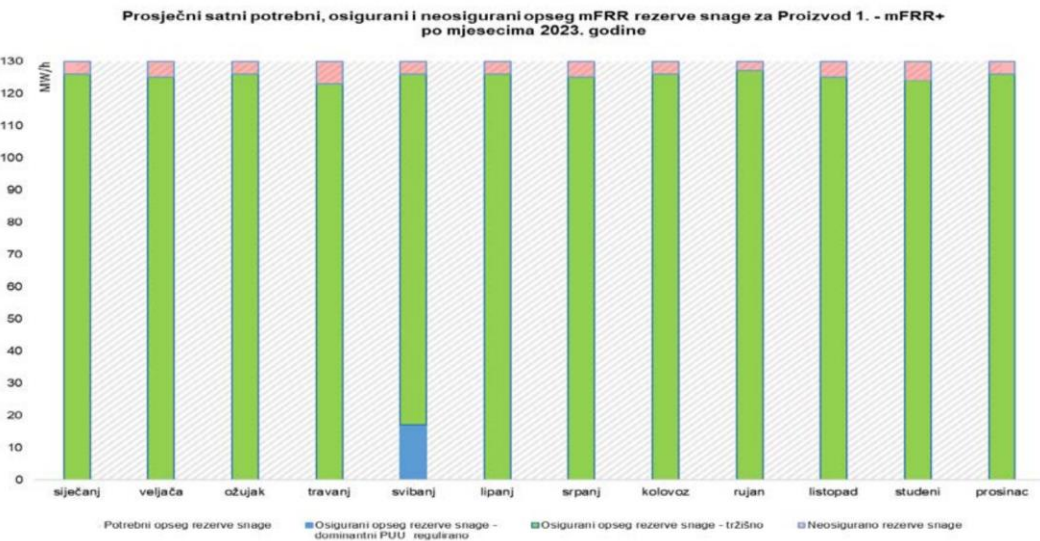


Registrirani pružatelji usluga aFRR/mFRR

Redni broj	Ime pružatelja usluge uravnoteženja	Vrsta usluge			
		aFRR+	aFRR-	mFRR+	mFRR-
1	ABS Sisak d.o.o.				
2	Cemex Hrvatska d.d.				
3	DS Smith Belize Croatia				
4	HEP-Proizvodnja d.o.o.				
5	INA-Industrija nafte d.d.				
6	KOER d.o.o.				
7	Messer Croatia plin d.o.o.				
8	NEXE d.d.				
9	PETROKEMIJA d d				
10	Podzemno skladište plina				
11	Nano Energies Hrvatska				

HOPS-ov javni registar pružatelja po pojedinom proizvodu - stanje na dan 17. veljače 2023.

Ukupna potrebna, osigurana i neosigurana mFRR rezerva snage mFRR+ po mjesecima 2023. godine



SIMPOZIJ O VOĐENJU EES-a
SYMPOSIUM ON POWER SYSTEM MANAGEMENT

Cavtat 4. – 7. studenoga 2024. / November 4 – 7, 2024

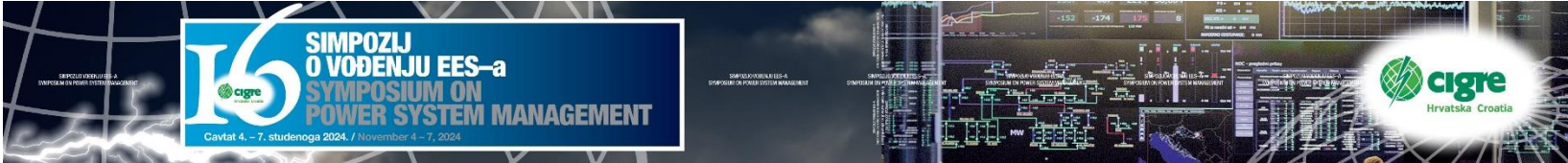
Mogućnosti pružanja pomoćnih usluga

	Alkalni		PEM		SOEC	
	Danas	2030	Danas	2030	Danas	2030
FCR	DA uz ograničenja	DA uz ograničenja	DA uz ograničenja	DA uz ograničenja	NE	Nedovoljno informacija
aFRR	DA uz ograničenja	DA uz ograničenja	DA	DA	NE	Nedovoljno informacija
mFRR	DA	DA	DA	DA	NE	Nedovoljno informacija
Regulacija napona	Elektrolizatori mogu sudjelovati u regulaciji napona/jalove snage u slučaju određene izvedbe ispravljača					
Komenzacijski rad	NE					
Crni start	NE Pružanje usluge crnog starta jedino u kombinaciji s gorivim člancima					
Rad u otočnom pogonu	NE Pružanje usluge crnog starta jedino u kombinaciji s gorivim člancima					
Upravljanje zagušenjima	DA	DA	DA	DA	NE	Nedovoljno informacija

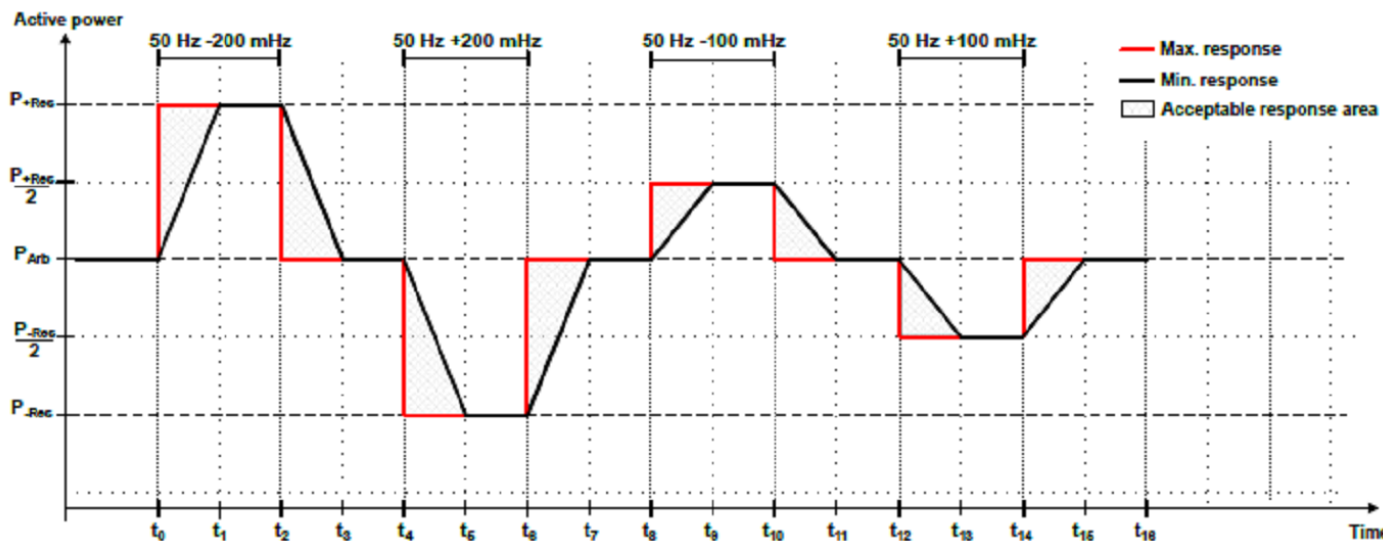


Osnovne karakteristike elektrolizatorskih postrojenja

Pomoćna usluga	Baterijska skladišta (BESS)	Elektrolizatorska postrojenja
Rezerva za održavanje frekvencije (FCR)	Brz i učinkovit odziv, idealno za FCR	Sporo reagiranje, nije pogodno za FCR zbog duljeg vremena prilagodbe
Rezerva za ponovnu uspostavu frekvencije s automatskom aktivacijom (aFRR)	Brz odziv, pogodno za sekundarnu regulaciju	Može prilagoditi potrošnju, ali sporija reakcija u odnosu na baterije
Rezerva za ponovnu uspostavu frekvencije s ručnom aktivacijom (mFRR)	Pogodno za srednjoročne korekcije, ali ograničeno kapacitetom	Učinkovito za dulje neravnoteže, ali sporiji odziv
Regulacija napona	Precizna regulacija putem inverterske tehnologije	Može prilagoditi potrošnju, ali nema mogućnost izravne regulacije jalove snage
Rad u otočnom pogonu	Brzo uključivanje i isključivanje, pogodno za otočne sustave, ali ograničeno energijom	Nije direktno prikladno, ali proizvedeni vodik može napajati gorivne članke ili generatore
Crni start	Brz odziv i sposobnost pokretanja sustava, idealno za kratkotrajnu obnovu mreže	Nije izravno korisno, ali proizvedeni vodik može se koristiti za pokretanje sustava kroz gorivne članke ili turbine



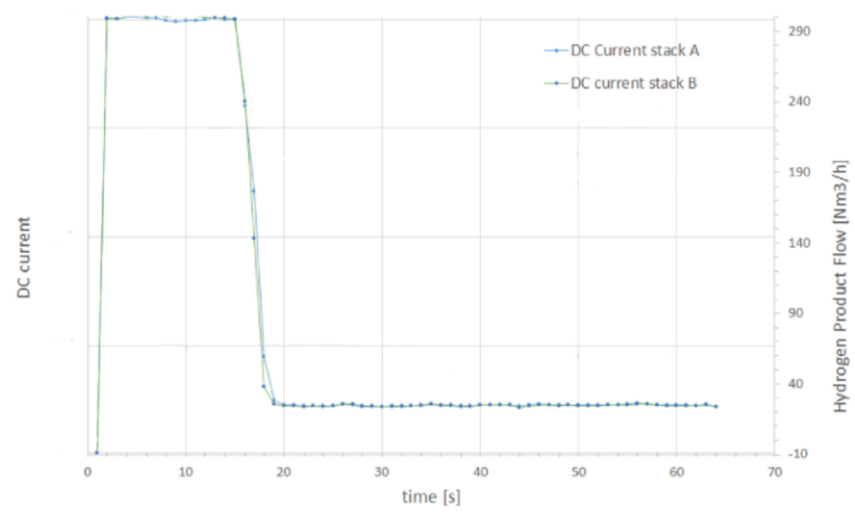
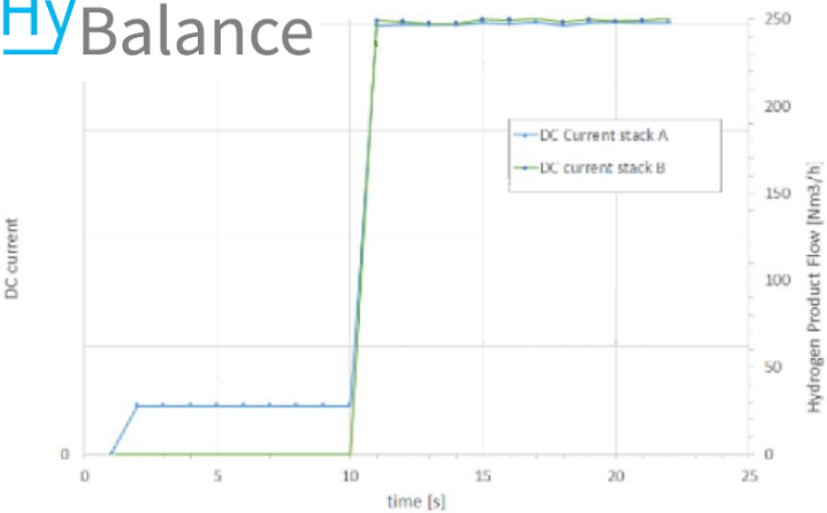
Primjer kvalifikacijskog testiranja – PEM elektrolizator



18.02.2020 09:47:10

18.02.2020 09:47:10

HyBalance



SYMPOZIJ O VOĐENJU EES-a
SYMPOSIUM ON POWER SYSTEM MANAGEMENT

16

cigre
Hrvatska Croatia

Cavtat 4. – 7. studenoga 2024. / November 4 – 7, 2024

SYMPOZIJ O VOĐENJU EES-a
SYMPOSIUM ON POWER SYSTEM MANAGEMENT

cigre
Hrvatska Croatia

NC DC - Utjecaj na integraciju vodikovih tehnologija



EU planira integraciju 30 GW P2G do 2028. godine. ugovori o priključenju se potpisuju par godina prije stoga OPS trebaju do kraja 2024. definirati tehničke uvjete za priključak elektrolizatorskih postrojenja.



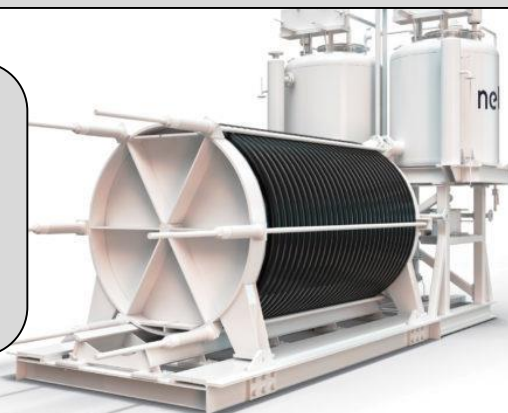
Iako će nova verzija NC DC 2.0 definirati minimalne tehničke uvjete za elektrolizatorska postrojenja, zahtjevi će stupiti na snagu tek tri godine nakon objave.



Nedostatak usklađenih tehničkih standarda može dovesti do ugroze stabilnosti sustava uključujući kaskadnu proradu zaštite



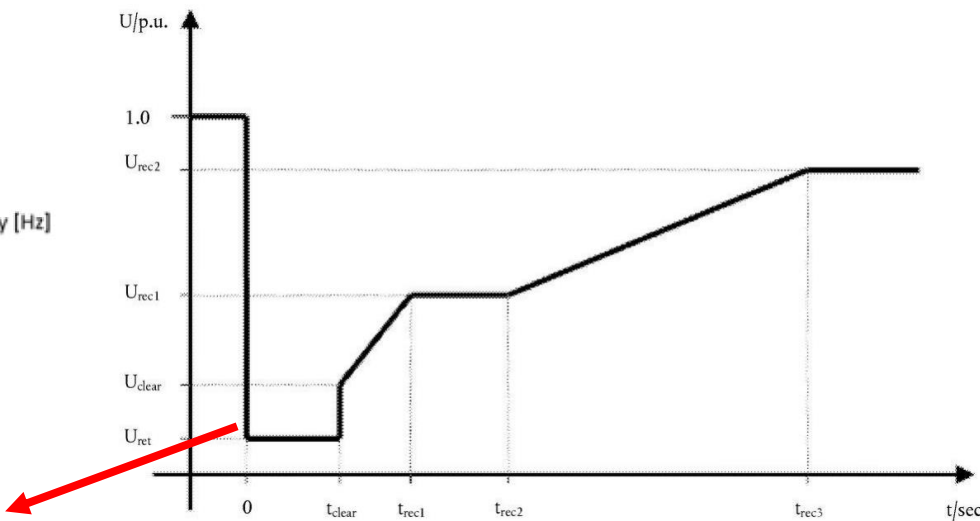
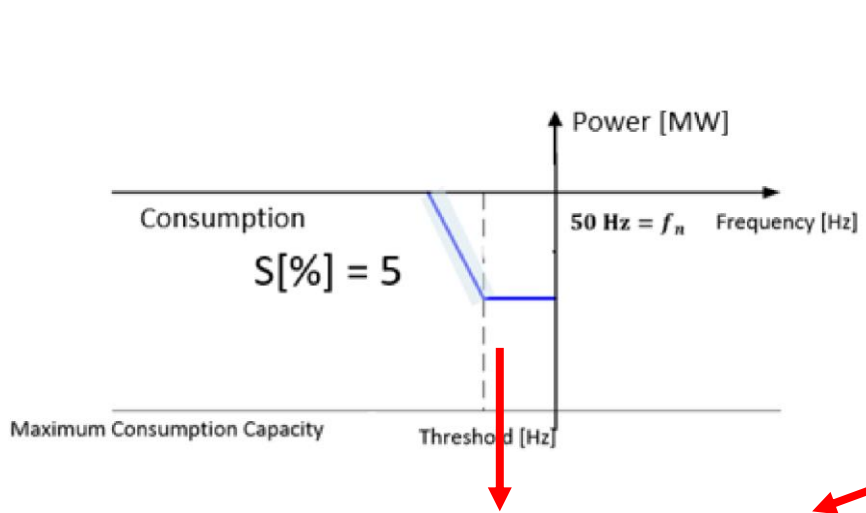
Preporučuje se da OPS unaprijed uvedu dodatne tehničke uvjete priključka za P2G postrojenja povezana na prijenosnu mrežu (110 kV+), kako bi se izbjegle potencijalne buduće retroaktivne primjene zahtjeva.



Slika : [NEL Alkalni elektrolizator](#)

Nesigurnost tehničkih uvjeta priključenja

- Najkritičniji dio regulative vezane uz elektrolizatorska postrojenja je zahtjev prolaska kroz stanje kvara.
- U slučaju prolaznog propada napona uslijed kvara u mreži, postrojenja moraju biti sposobna unutar nekoliko sekundi ponovno dosegnuti puni radni kapacitet (razinu aktivne snage prije kvara), postižući najmanje 90-100% razine potrošnje.



Predstavlja značajan tehnički izazov za proizvođače elektrolizatora. Može dovesti do povećanja troškova opreme i rokova isporuke.

Time parameters (seconds)	
U_{ret} :	0
U_{clear} :	0
U_{rec1} :	0
U_{rec2} :	0,85
t_{clear} :	0,15
t_{rec1} :	0,15
t_{rec2} :	0,15
t_{rec3} :	3,0

Utjecaj naglog zaustavljanja na rad elektrolizatora



Nagli ispad može uzrokovati **naglu promjenu električne struje**, što može dovesti do **stresa na ključnim komponentama poput elektroda, membrana i energetske elektronike**, potencijalno skraćujući njihov vijek trajanja



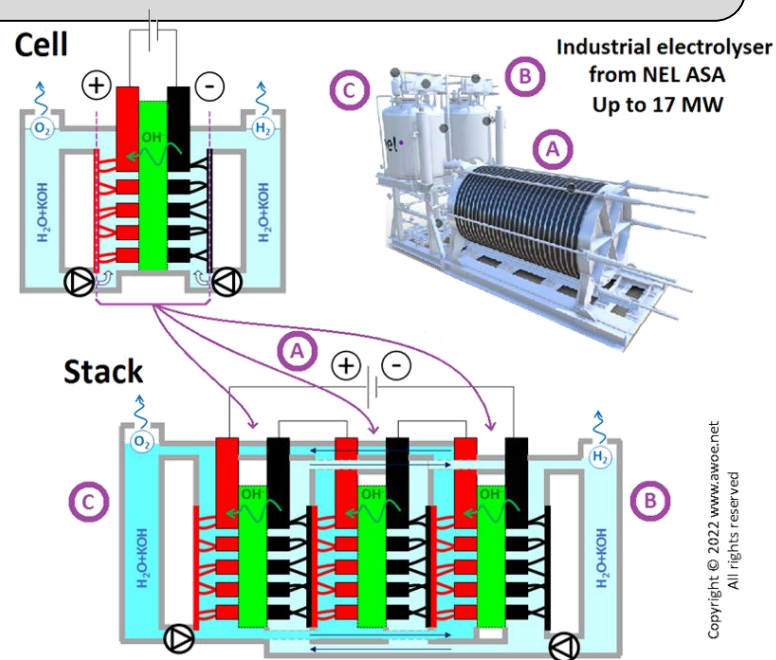
Ako se elektrolizer iznenada isključi, **ne može odmah ponovno započeti proizvodnju vodika** na optimalnim razinama. To može rezultirati nešto dužim zastojem u proizvodnji i smanjenom ukupnom učinkovitosti.



Nagli ispad može **poremetiti unutarnje kemijske procese**, kao što su **cirkulacija elektrolita i odvajanje plina**, koji zahtijevaju stabilne uvjete za održavanje performansi. Ova nestabilnost može dovesti do neučinkovitosti ili potrebe za ponovnom kalibracijom sustava.



Česti nagli ispadi mogu dovesti do povećanog trošenja sustava, što rezultira **višim troškovima održavanja i češćim popravcima**.



Copyright © 2022 www.awoc.net
All rights reserved

Pružanje pomoćnih usluga - projekti na razini EU



- PEM elektrolizator 10 MW – 20mil€
- Proizvodnja za potrebe rafinerije Rhineland (Shell)
- Utiskivanje u postojeći plinovod
- Balansiranje opterećenja rafinerije
- Uravnoteženje sustava
- **II faza – 100MW – FID Shell**



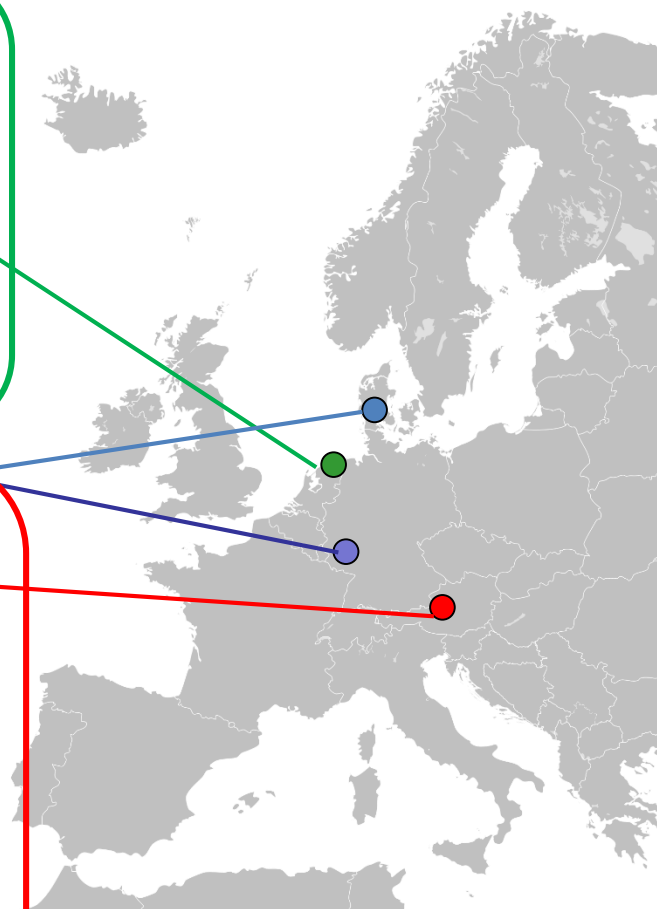
- Alkalni elektrolizator 20 MW
- Proizvodnja za potrebe proizvodnje zelenog metanola
- sudjelovanje u pružanju pomoćne usluge aFRR



- PEM elektrolizator 1,25 MW
- Proizvodnja za potrebe industrije (direktni cjevovod) i transporta
- Brzina odziva:
 - 10%-100% - 1sec
 - 100%-10% - 4sec
- Sudionik na svim tržištima certificiran od strane Danskog TSO



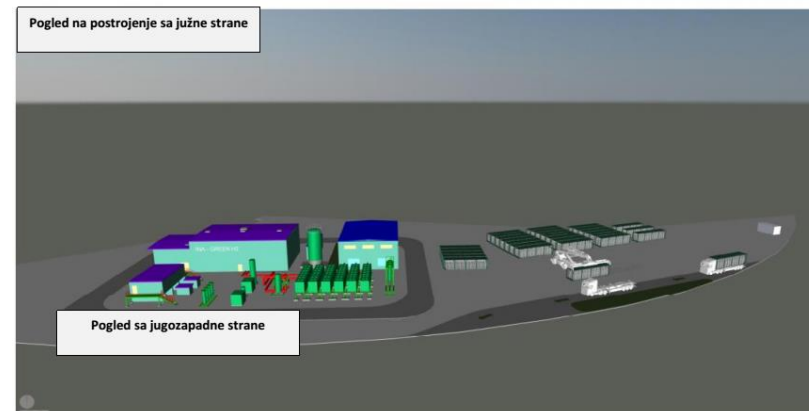
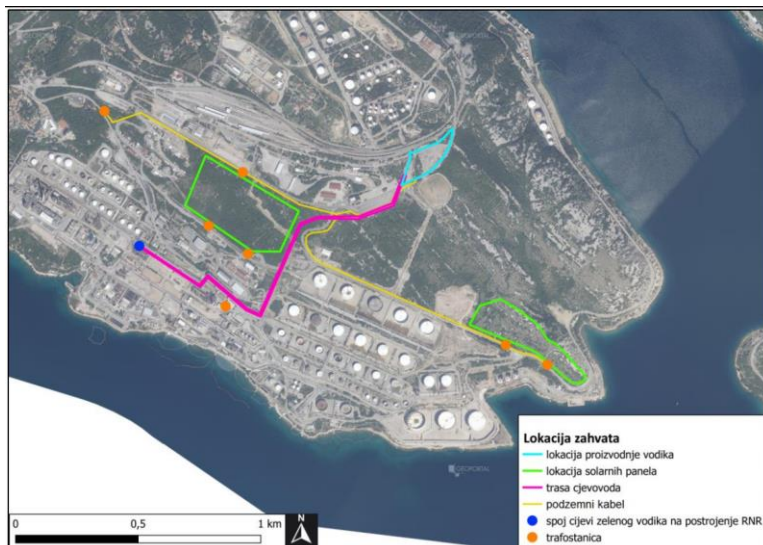
- PEM elektrolizator 6 MW
- Proizvodnja za potrebe čelične industrije
- Brzina odziva:
 - 0%-50% - 1min 15sec
 - +/- 16% - 8sec
- Sudionik na svim tržištima certificiran od strane Austrijskog TSO



Metodologija za izračun isplativosti ulaganja te sudjelovanje elektrolizatorskih postrojenja na tržištima energije i uravnoteženja

Projekt zelenog vodika - INA refinerija nafte:

- PEM elektrolizator snage 10MW – 1.500 t/god: proizvodnja za potrebe prometnog sektora i za vlastitu potrošnju u Rafineriji.
- Fotonaponska elektrana ukupne snage 11 MW: god.proizv. 18.000 MWh



Izvor: Idejno rješenje proizvodnje zelenog vodika na PEM elektrolizatoru s namjenskom fotonaponskom elektranom, tvrtka INŽENJERING ZA NAFTU I PLIN d.o.o

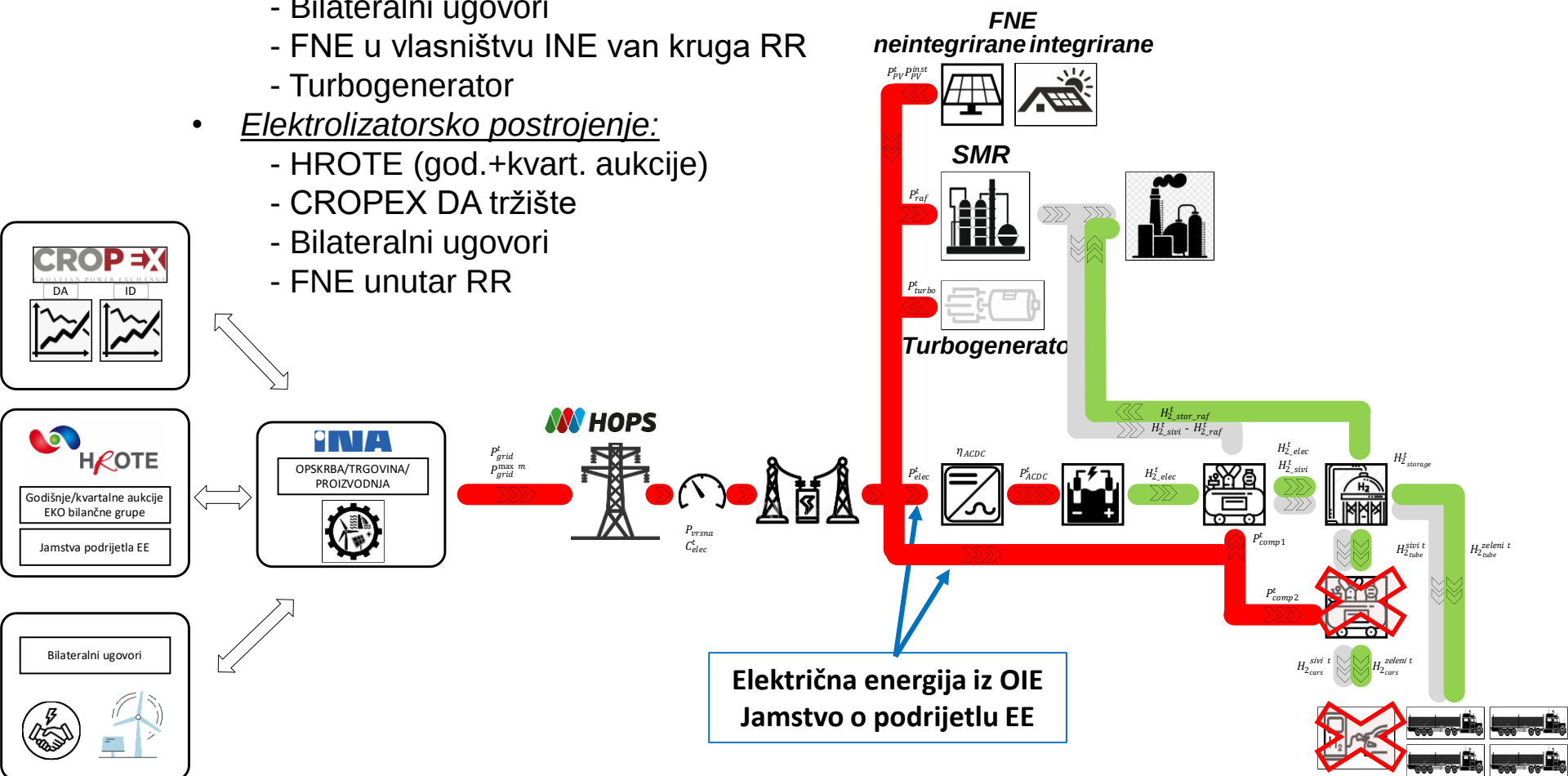
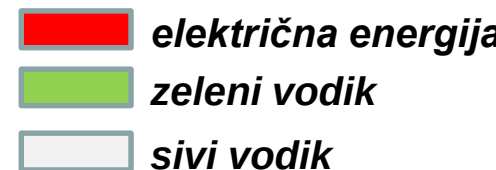


Tržišni model – prikaz modela

Projekt zelenog vodika INA refinerija nafte

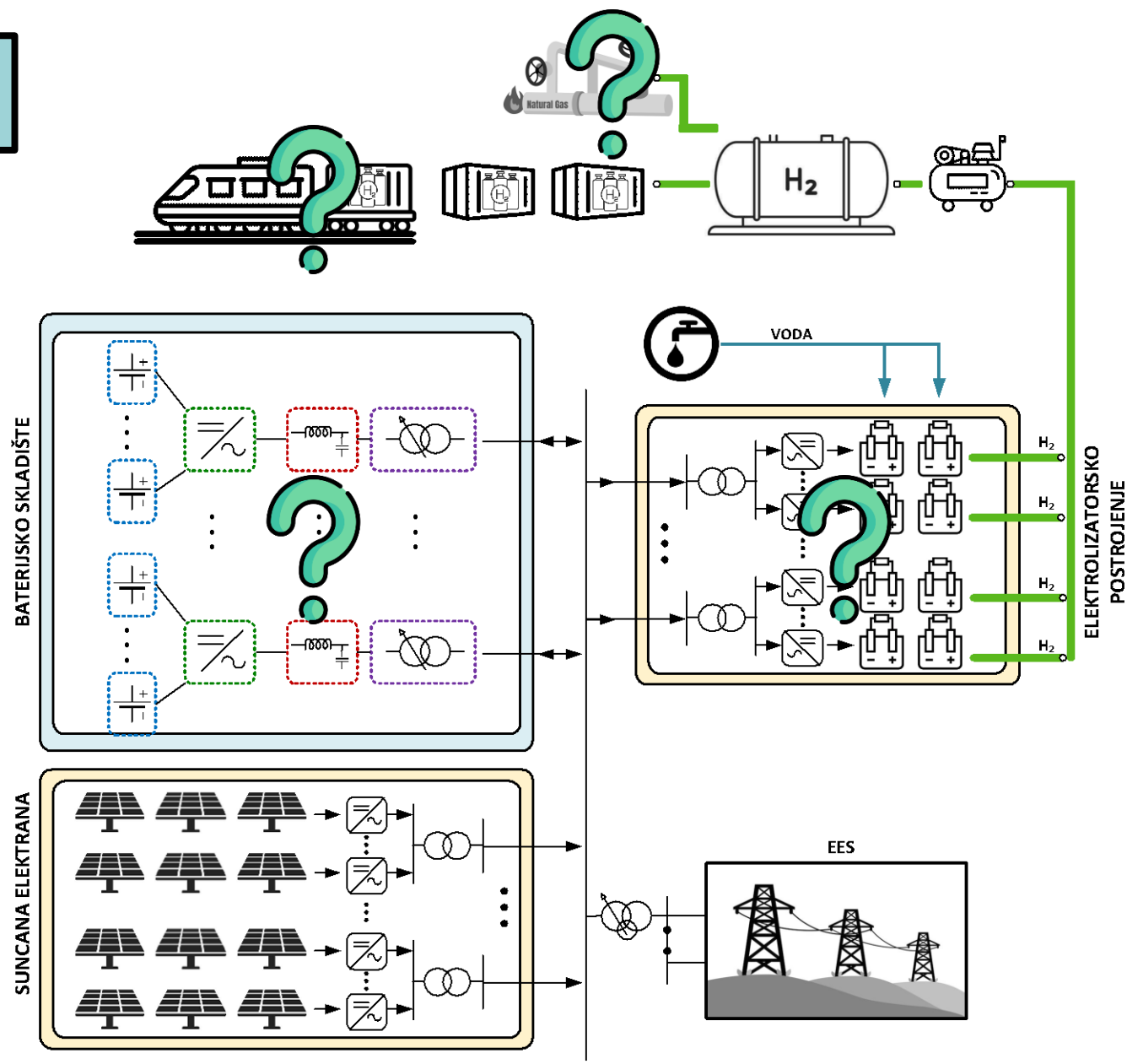
Nabavka električne energije:

- Rafinerija Rijeka:
 - HROTE (god.+kvart. aukcije)
 - CROPEX DA tržište
 - Bilateralni ugovori
 - FNE u vlasništvu INE van kruga RR
 - Turbogenerator
- Elektrolizatorsko postrojenje:
 - HROTE (god.+kvart. aukcije)
 - CROPEX DA tržište
 - Bilateralni ugovori
 - FNE unutar RR

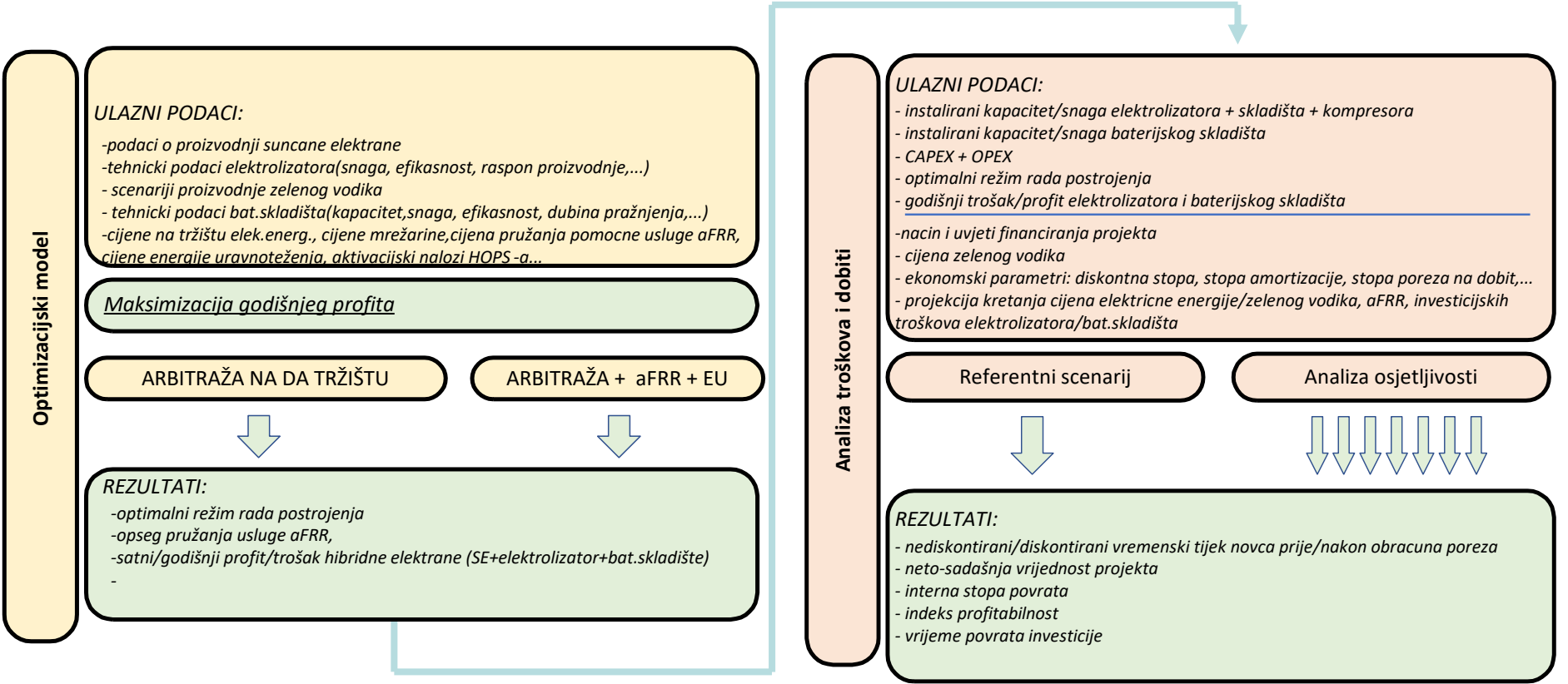


Metodologija za izračun isplativosti ulaganja te sudjelovanje elektrolizatorskih postrojenja na tržištima energije i uravnoteženja

Projekt PV+H₂+BES
TEC OIE/PETROL



Opis metodologije



Opis metodologije

<= Funkcija cilja: maksimizacija prihoda/minimizacija troška na DA tržištu (SE+ELEK.+BAT.SKL.)

$$\max_{dis_t, ch_t, p_t^{EP}} p^{god}$$

$$p^{god} = p^{predana} - T^{pruzeta}$$

$$p^{predana} = \sum_{t \in T} c_t^{DA} \cdot e_t^{DA+} + c^{JP} \cdot \sum_{t \in T} e_t^{DA} \quad \text{<= prihod na DA tržištu + prihod od JP}$$

$$T^{pruzeta} = \sum_{t \in T} (c_t^{DA} + c_t^{mreža} + c^{OIE}) \cdot e_t^{DA-} + \sum_{m \in M} c^{Pmax} \cdot p_m^{Pmax} \quad \text{<= trošak preuzete E + trošak vršne snage}$$

$$e_t^{DA} = (p_t^{SE} + dis_t - ch_t - p_t^{EP}) \Delta t \quad \forall t \in T \quad \text{<= prodaja/kupnja na DA tržištu u satu } t$$

$$e_t^{DA} = e_t^{DA+} - e_t^{DA-} \quad \forall t \in T$$

$$e_t^{DA+} \geq 0, e_t^{DA-} \quad \forall t \in T$$

$$p_m^{Pmax} \geq \frac{e_t^{DA-}}{\Delta t} \quad \forall t \in m, \forall m \in M \quad \text{<= iznos vršne snage u mjesecu } m$$

$$dis_t - ch_t + p_t^{SE} - p_t^{EP} \geq -p^{prik} \quad \forall t \in T$$

$$dis_t - ch_t + p_t^{SE} - p_t^{EP} \leq p^{prik} \quad \forall t \in T \quad \text{<= ograničenje priključne snage na PCC}$$

Opis metodologije

MODEL BATERIJSKOG SKLADIŠTA

$$\frac{SOE^{max}}{k} = P_{max}^{ch_ds}$$

<= odnos kapaciteta/nazivne snage BS

$$DoD \cdot SOE^{max} \leq soe_t \leq SOE^{max} \quad \forall t \in T$$

<= donja/gornja granica napunjenosti BS

$$SOE^{max} = SOE_{init}^{max} \cdot (1 - n \cdot d)$$

<= degradacija kapaciteta BS kroz godine

$$soe_t = soe_{t-1} + \Delta t \left(ch_t \cdot \eta^{ch} - \frac{dis_t}{\eta^{dis}} \right)$$

$\{\forall t \in T | t > 1\}$ <= SoE u satu t

27

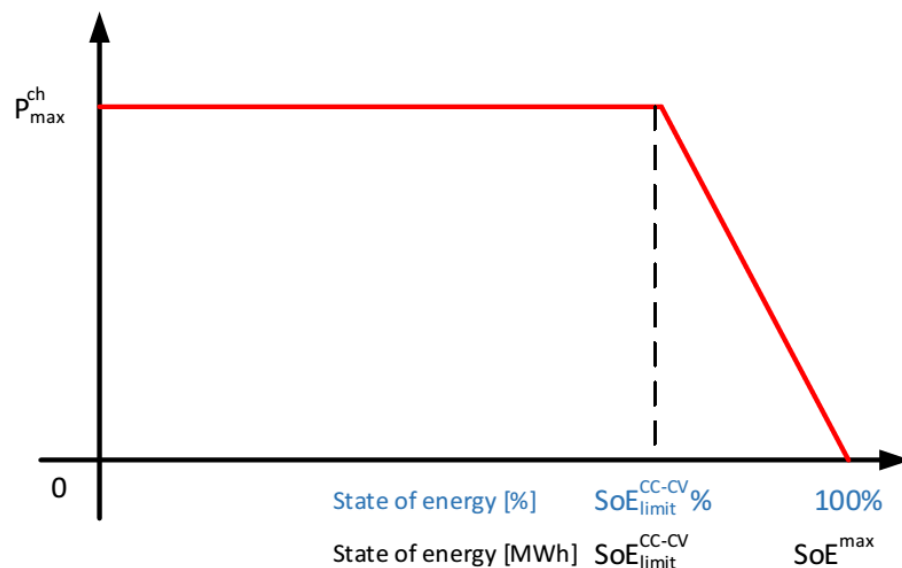
Ograničenja vezana uz maksimalnu snagu punjenja/pražnjenja

$$ch_t \leq b_t \cdot P_{max,t}^{ch_ds} \quad \forall t \in T$$

$$dis_t \leq (1 - b_t) \cdot P_{max}^{ch_ds} \quad \forall t \in T$$

$$P_{max,t}^{ch_ds} \leq P_{max}^{ch_ds} \quad \forall t \in T$$

$$P_{max,t}^{ch_ds} \leq \frac{1}{k} \cdot \frac{SOE^{max} - soe_t}{1 - SOE_{limit}^{CC-CV}} \quad \forall t \in T$$



Opis metodologije

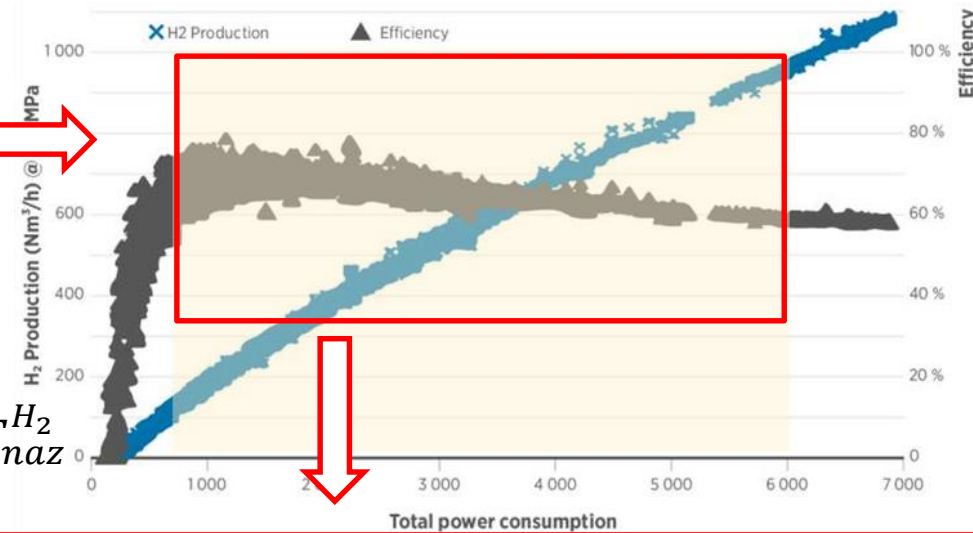
MODEL ELEKTROLIZATORSKOG POSTROJENJA

$$E_t^{elek} = \frac{39.4 \text{ kWh/kg} \cdot T_t^{H_2}}{1000 \cdot \eta_t^{elek}}$$

$$E_t^{elek} = P_t^{elek} \cdot \Delta t$$

$$0.1 \cdot P_{naz}^{elek} \cdot b_t^{elek} \leq P_t^{elek} \leq P_{naz}^{elek} \cdot b_t^{elek}$$

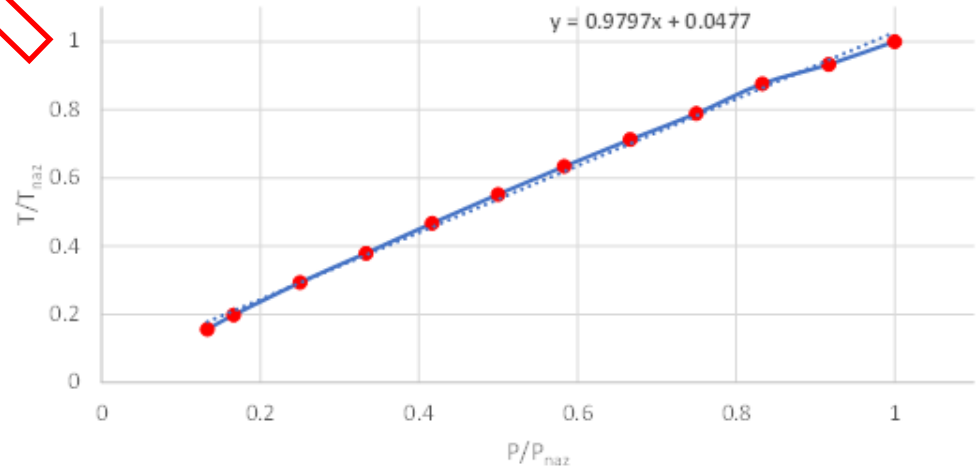
$$T_t^{H_2} = \left(0.9797 \cdot \frac{P_t^{elek}}{P_{naz}^{elek}} + 0.0477 \cdot b_t^{elek} \right) \cdot T_{naz}^{H_2}$$



KOMPRESOR

$$E_{com} = \frac{\bar{z}_c \cdot R \cdot T_{in}^c \cdot n_c}{0.49603 \cdot 3600 \cdot \eta_c} \left(\frac{k_c}{k_c - 1} \right) \left[\left(\frac{P_{out}^c}{P_{in}^c} \right)^{\frac{k_c - 1}{n_c \cdot k_c}} - 1 \right]$$

$$P_{comp}^t \cdot \Delta t = T_t^{H_2} \cdot E_{comp}$$



BILANCA VODIKA

$$T_t^{H_2_{storage}} = T_{t-1}^{H_2_{storage}} + T_t^{H_2} - T_t^{H_2_{tube}} - T_t^{H_2_{plin}}$$

$$\sum_{t \in T} T_t^{H_2} = \sum_{t \in T} \left(T_t^{H_2_{transport}} + T_t^{H_2_{plin}} \right)$$

$$\sum_{t \in T} T_t^{H_2_{plin}} = T_{god}^{H_2_{plin}}$$

$$\sum_{t \in T} T_t^{H_2_{transport}} = T_{god}^{H_2_{transport}}$$



**GODIŠNJA PROIZVODNJA
VODIKA ZA INDUSTRIJU**



**GODIŠNJA PROIZVODNJA
VODIKA ZA TRANSPORT**

Opis metodologije

$$\max_{dist_t, ch_t, p_t^{EP}} p^{god} + p^{aFRR} + p^{EU}$$

<= Funkcija cilja: maksimizacija prihoda na DA tržištu + tržištu rezervi/uravnoteženja (aFRR+EU)

$$p^{aFRR} = \sum_t p_t^{aFRR\uparrow} \cdot c_t^{aFRR\uparrow} + \sum_t p_t^{aFRR\downarrow} \cdot c_t^{aFRR\downarrow}$$

<= ukupni prihod od rezervacije kapaciteta za aFRR

$$\begin{aligned} p_t^{aFRR\uparrow} &= p_t^{bat\uparrow} + p_t^{H_2\uparrow} & p_t^{bat\uparrow} &= p_t^{\Delta ch\downarrow} + p_t^{\Delta ds\uparrow} \\ p_t^{aFRR\downarrow} &= p_t^{bat\downarrow} + p_t^{H_2\downarrow} & p_t^{bat\downarrow} &= p_t^{\Delta ch\uparrow} + p_t^{\Delta ds\downarrow} \end{aligned}$$

<= iznos rezerviranog kapaciteta za pozitivnu/negativnu aFRR rezervu,

Način osiguranja pozitivne/negativne aFRR rezerve

Elektrolizatorsko postrojenje

$$\begin{aligned} p_t^{H_2\uparrow} &\leq p_t^{elek} \\ p_t^{H_2\downarrow} &\leq p_{naz}^{elek} - p_t^{elek} \end{aligned}$$

Baterijsko skladište

$$\begin{aligned} p_t^{\Delta ch\downarrow} &\leq ch_t & p_t^{\Delta ds\downarrow} &\leq dist_t \\ p_t^{\Delta ds\uparrow} &\leq p_{max}^{ch_ds} - dist_t & p_t^{\Delta ch\uparrow} &\leq p_{max,t}^{ch_ds} - ch_t \\ p_t^{\Delta ch\downarrow} &\geq ch_t - M \cdot b_t^{ch_lim} & p_t^{\Delta ds\downarrow} &\geq dist_t - M \cdot b_t^{dis_lim} \\ -p_t^{\Delta ds\uparrow} &\geq -M(1 - b_t^{ch_lim}) & -p_t^{\Delta ch\uparrow} &\geq -M(1 - b_t^{dis_lim}) \end{aligned}$$

$$p^{EU} = \sum_t e_t^{EU\uparrow} \cdot c_t^{EU\uparrow} - \sum_t e_t^{EU\downarrow} \cdot c_t^{EU\downarrow}$$

<= ukupni prihod/trošak od EU

$$\begin{aligned} c_t^{EU\downarrow} &= 0.6 \cdot e_t^{DA} & \text{<= cijena poz. EU u trenutku } t & e_t^{EU\uparrow} = A_t^{\uparrow} \cdot \Delta t \cdot p_t^{aFRR\uparrow} \\ c_t^{EU\uparrow} &= 1.4 \cdot e_t^{DA} & \text{<= cijena neg. EU u trenutku } t & e_t^{EU\downarrow} = A_t^{\downarrow} \cdot \Delta t \cdot p_t^{aFRR\downarrow} \end{aligned}$$

Opis metodologije

$$\begin{aligned} -ch_t + p_t^{SE} - p_t^{elek} - p_t^{aFRR\downarrow} &\geq -p^{prik} \\ dis_t + p_t^{SE} - p_t^{elek} + p_t^{aFRR\uparrow} &\leq p^{prik} \end{aligned}$$

<= ograničenje priključne snage na PCC

Osiguranje adekvatne razine napunjenosti BS u slučaju pune aktivacije rezerve
– samo na razini tog sata-

$$\begin{aligned} soe_{t-1} + \Delta t \cdot \eta^{ch} \cdot (ch_t - p_t^{\Delta ch\downarrow}) - \Delta t \cdot \frac{1}{\eta^{dis}} (dis_t + p_t^{\Delta ds\uparrow}) &\geq DoD \cdot SOE^{max} \\ soe_{t-1} + \Delta t \cdot \eta^{ch} \cdot (ch_t + p_t^{\Delta ch\uparrow}) - \Delta t \cdot \frac{1}{\eta^{dis}} (dis_t - p_t^{\Delta ds\downarrow}) &\leq SOE^{max} \end{aligned}$$

SoE u satu t uvažavajući zaključene pozicije na DA tržištu te aktivaciju rezervi

$$\begin{aligned} soe_t = soe_{t-1} + \Delta t \cdot \eta^{ch} \cdot (ch_t - A_t^{\uparrow} \cdot p_t^{\Delta ch\downarrow} + A_t^{\downarrow} \cdot p_t^{\Delta ch\uparrow}) - \Delta t \cdot \frac{1}{\eta^{dis}} \\ \cdot (dis_t - A_t^{\downarrow} \cdot p_t^{\Delta ds\downarrow} + A_t^{\uparrow} \cdot p_t^{\Delta ds\uparrow}) \end{aligned}$$

Maksimalna snaga punjenja

$$\begin{aligned} ch_t + p_t^{\Delta ch\uparrow} &\leq b_t \cdot P_{max,t}^{ch_{ds}} \\ dis_t + p_t^{\Delta ds\uparrow} &\leq (1 - b_t) \cdot P_{max}^{ch_{ds}} \end{aligned}$$

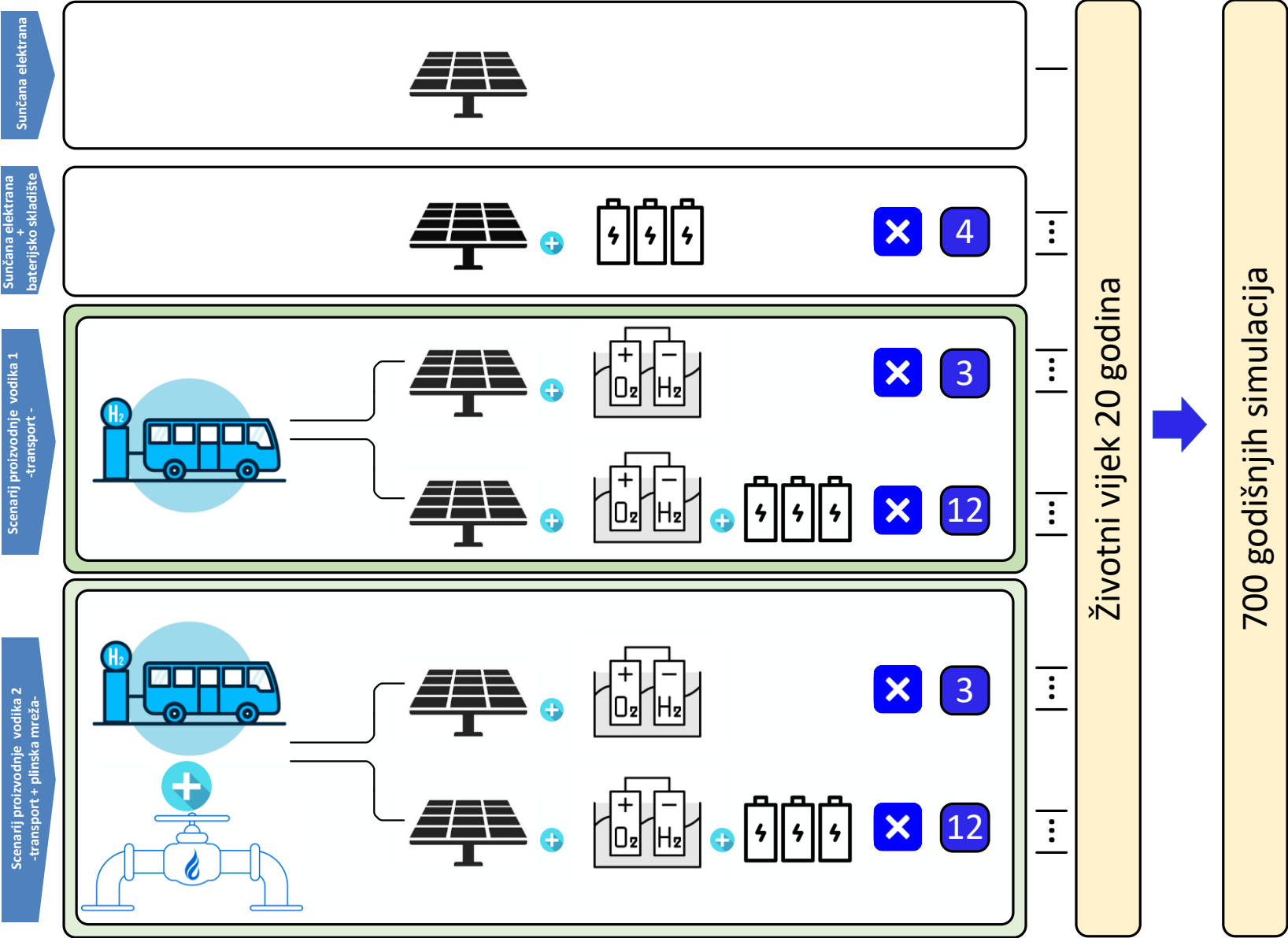
$$P_{max,t}^{ch_{ds}} \leq P_{max}^{ch_{ds}} \quad \forall t \in T$$

$$P_{max,t}^{ch_{ds}} \leq \frac{1}{k} \cdot \frac{SOE^{max} - soe_t}{1 - SOE_{limit}^{CC-CV}} \quad \forall t \in T$$

Utjecaj na satnu proizvodnju vodika

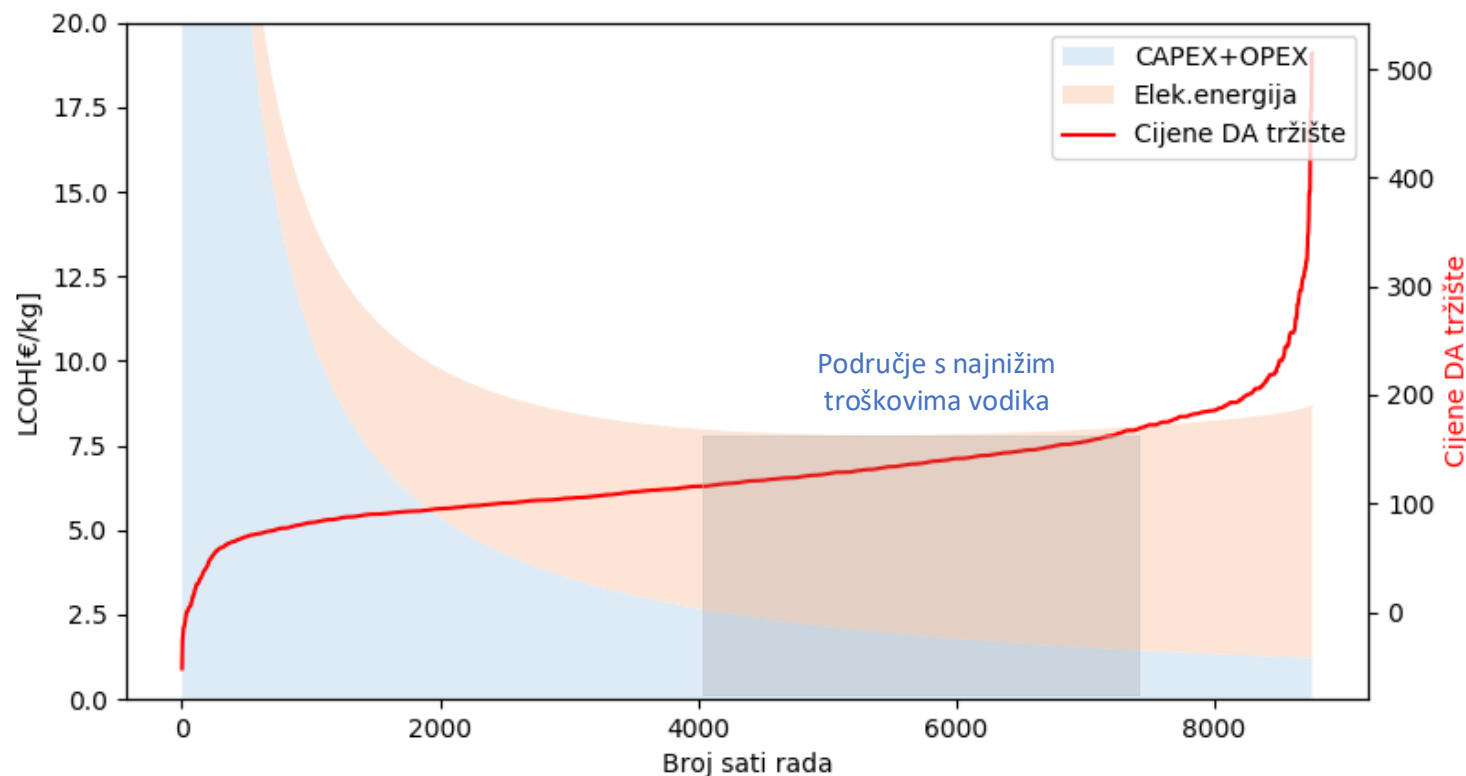
$$T_t^{H_2} = \left(0.9797 \cdot \frac{p_t^{elek} - A_t^{\uparrow} \cdot p_t^{H_2\uparrow} + A_t^{\downarrow} \cdot p_t^{H_2\uparrow}}{p_{naz}^{elek}} + 0.0477 \cdot b_t^{elek} \right) \cdot T_{naz}^{H_2}$$

Poslovni scenariji



GENERALNI ZAKLJUČCI - Dimenzioniranje elektrolizatora i utjecaj faktora angažiranja na isplativost

Utjecaj povećanja kapaciteta / smanjenja faktora angažiranja na LCOH



**prikaz u kontekstu tržišnog modela s nabavom EE isključivo na DA marketu
(samo za ilustraciju principa)*

CAPEX: 1,25mil€/MW, OPEX:4%, DA market prosječna cijena: 126€/kg

- Povećanje efektivnog broja sati rada smanjuje udio CAPEXa po kg proizvedenog vodika
- Povećanje efektivnog broja sati rada podrazumijeva rad elektrolizatorskog postrojenja u trenucima visokih cijena elek.energije pa rastu troškovi EE → **pitanje optimalne snage**

ISPLATIVOST ULAGANJA U ELEKTRIZATORSKO POSTROJENJE

- **LCOH:**

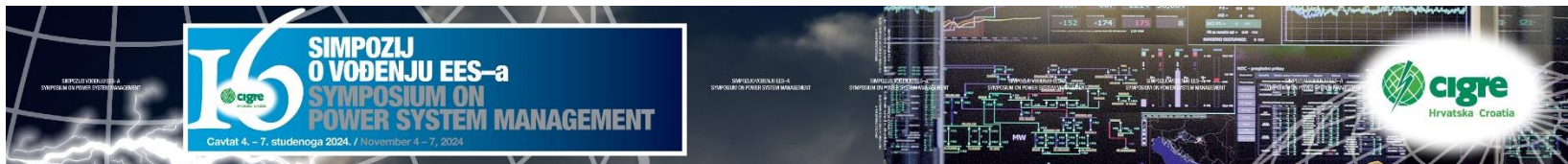
- u dosada razmatranim analizama LCOH se kreće u rasponu od 6.3 – 9 €/kg.
- Iz današnje perspektive značajno povećanje snage elektrolizatora u pravilu rezultira većim troškom proizvodnje vodika.
- U budućnosti veća disperzija cijena na DA tržištu te veće cijene pružanja usluga vjerojatno će ići u prilog rada elektrolizatora s nižim faktorom angažiranja.

- **Isplativost:**

- Vrijeme povrata investicije u slučaju optimalnog scenarija izgradnje 11-12 godina uz otkupnu cijenu od 7€/kg.
- Trenutne cijene na punionicama: 10-24€/kg

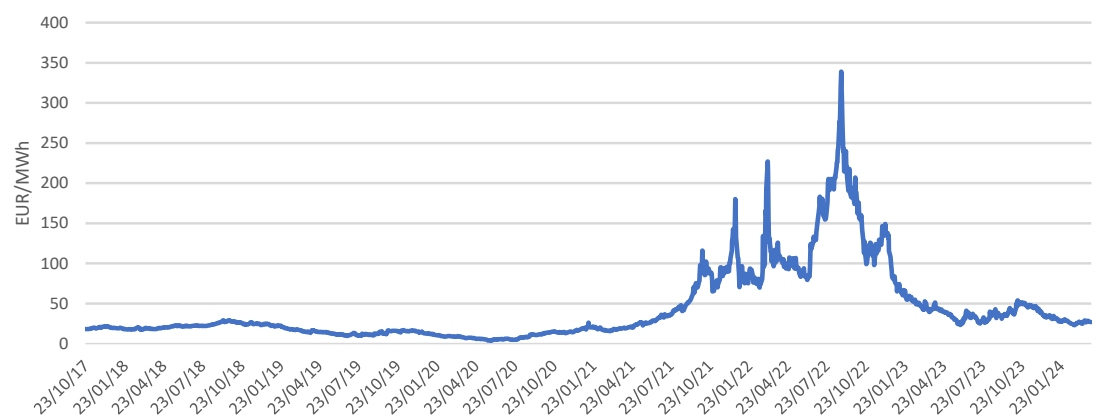
- **Prihod od pružanja pomoćnih usluga:**

- Udio prihoda od pomoćnih usluga može iznositi između 10% i 30% ukupnih prihoda i ovisit će o tržišnim prilikama
- Nije za očekivati značajne prihode od sudjelovanja u pružanju nefrekevencijskih usluga poput regulacije napona i jalove snage

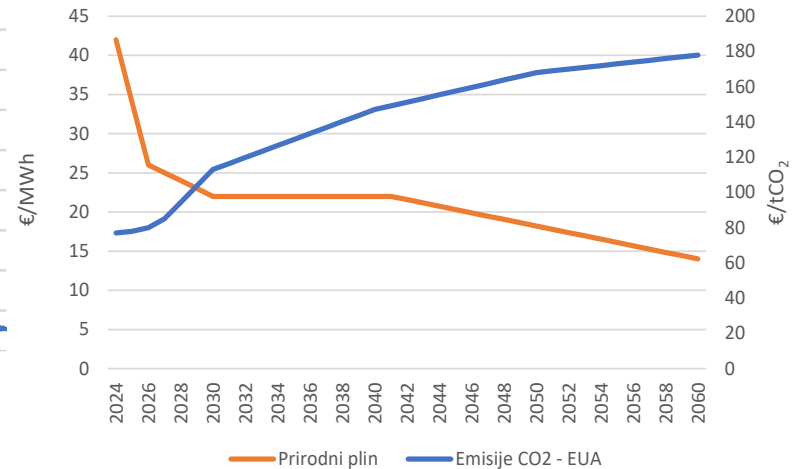


Isplativosti i ograničenja plasmana zelenog vodika u plinsku mrežu

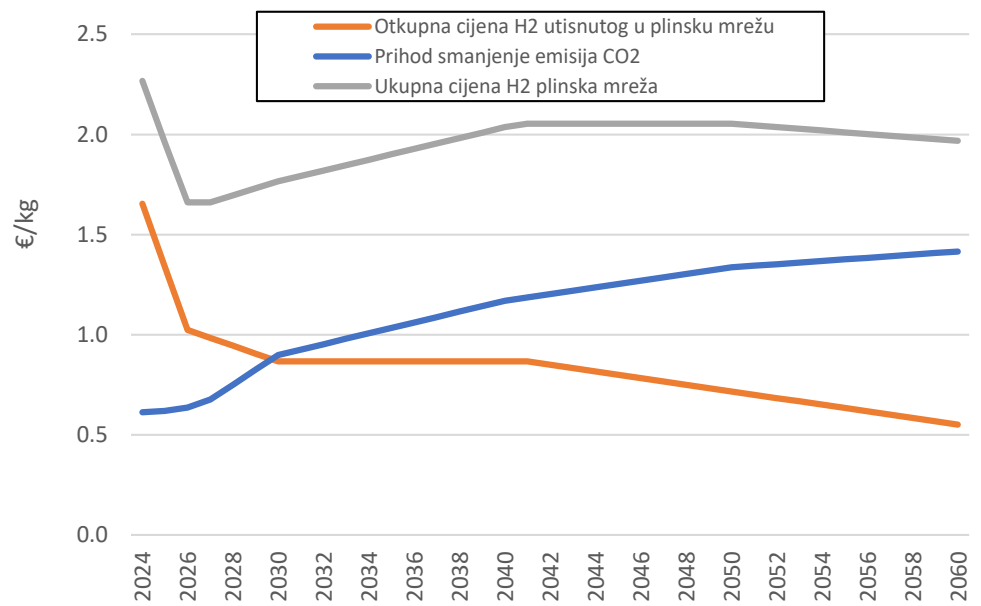
Kretanja cijena prirodnog plina u razdoblju 10/2017- 01/2024 (Dutch TTF Natural Gas)



Projekcija kretanja cijena prirodnog plina i emisija CO2 za razdoblje od 2024.-2060.g



Projekcije otkupnih jediničnih cijena za vodik koji se utiskuje u plinsku mrežu



Isplativosti i ograničenja plasmana zelenog vodika u plinsku mrežu

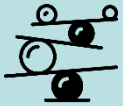
- Poslovni modeli koji uključuju prodaju zelenog vodika po cijeni prirodnog plina za projekte koji se grade kroz narednih nekoliko godina su neisplativi;
- Rezultati provedenih analiza u sklopu dosada provedenih studija ukazuju da je prodaja zelenog vodika po cijeni prirodnog plina čak uz **100% sufinanciranje investicije neisplativa u slučaju dugoročnog kretanja cijena (prirodnog plina i troškova emisija CO₂)** sukladno prethodnim pretpostavkama (uz današnje cijene EE i CAPEX elektrolizatora).
- **Paritet s prirodnim plinom i isplativost ovakvih poslovnih modela se očekuje iza 2030. g.** kada se očekuje pad LCOH za cca. 60%. Ovo smanjenje omogućit će jeftinija električna energija iz obnovljivih izvora, veća učinkovitost elektrolizatora te znatno manji kapitalni troškovi elektrolizatora.
- **Nužni poticaji u obliku subvencioniranja investicija te poticaja u obliku fiksnih premija za otkup zelenog vodika.**
- **Europska banka za vodik:**
 - rezultati prve dražbe (11/2023 – ukupno prijavljeno 132 projekta - 8.5GW snage):
 - gornji prag ponuda za fiksnu premiju iznosio 4,5€/kg
 - Ponude po sistemu pay-as-bid u rasponu (10g): **0,37-0,48€/kg**
 - Potpora za izgradnju 1142MW elektrolizatora (ES, PT, NO, SE, FI) i proizvodnju 1.52 milt_H2/10g

Isplativosti i ograničenja plasmana zelenog vodika u plinsku mrežu

Generalna ograničenja za plasman vodika u plinsku mrežu:



Utjecaj na uređaje: Sadržaj vodika u plinu utječe na rad plamenika i motora (Wobbeov indeks i metanski broj).



Preporučene koncentracije:

- Motori s unutarnjim izgaranjem: do 2% vodika.
- Namjenski plinski motori: do 10% uz sofisticirane sustave.
- Plinske turbine: Većina dozvoljava do 5% vodika uz minimalne prilagodbe.



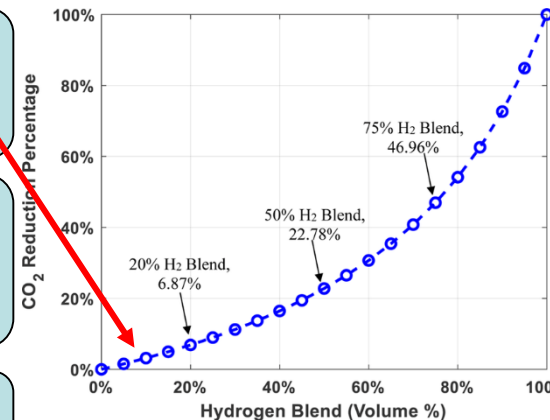
Sustavi prirodnog plina: Mogu koristiti smjese s do 10% vodika bez štetnih efekata.



Europski standardi: Različiti standardi kvalitete plina ometaju slobodan protok i integraciju tržišta.



Fleksibilnost vs. stabilnost: Operatetri traže širok Wobbeov indeks, dok krajnji korisnici preferiraju uži raspon.



Isplativosti i ograničenja plasmana zelenog vodika u plinsku mrežu

Specifična ograničenja na razini Hrvatske plinske mreže:



Distribucijski sustavi za PP, UNP, bioP moraju biti fizički odvojeni kako bi se spriječilo miješanje različitih vrsta plina. Dozvoljeno je umješavanje s PP samo ako se mogu tehnički i sigurno dodati, te ako dobivena smjesa ispunjava standardnu kvalitetu PP propisanu Općim uvjetima opskrbe.



Standard kvalitete plina: Vodik nije trenutno uključen kao dozvoljeni element u sastavu plina.



Kompatibilnost s postojećom infrastrukturom:

- Kompatibilnost s postojećim kompresorima i mjernim stanicama.
- Osjetljivost cjevovoda na curenje i krhkost uz vodik.



Regulacija tlaka i protoka: Prilagodbe potrebne za pouzdanu opskrbu, osobito u Dalmaciji gdje je potrošnja niska.



Senzorska tehnologija: Konvencionalni kromatografi nisu dovoljni; potrebna su naprednija rješenja za detekciju vodika.



Integritet cjevovoda: Vodik može uzrokovati koroziju ili oštećenja, što zahtijeva analize i mjere sigurnosti.

Prilike

Fleksibilnost i prilagodljivost: mogu brzo prilagoditi svoj rad te doprinijeti ravnoteži između potražnje i ponude električne energije.

Integracija obnovljivih izvora: iskorištavanjem viška energije iz OIE mogu se smanjiti troškovi proizvodnje vodika te potencijalno smanjiti zagušenja u mreži.

Poboljšanje stabilnosti mreže: Sudjelovanje u regulaciji frekvencije i napona može doprinijeti stabilnosti elektroenergetskog sustava.

Izazovi

Visoki troškovi: Početna ulaganja i operativni troškovi elektrolizatora mogu biti visoki, što može otežati njihovu ekonomsku isplativost.

Tehnološke prepreke: Potreba za daljnjim razvojem tehnologije radi povećanja učinkovitosti, smanjenja troškova, ispunjenja uvjeta priključka može usporiti širu primjenu.

Regulativni izazovi: Nedostatak jasno definirane regulative i poticaja za korištenje elektrolizatora.

Tržišna konkurencija: Konkurencija s drugim tehnologijama skladištenja energije može predstavljati izazov za integraciju elektrolizatora.

Iako postoje značajne prepreke, potencijalne prilike koje elektrolizatori nude u kontekstu energetske tranzicije i stabilizacije elektroenergetskog sustava čine ih važnim elementom budućnosti energetskih sustava

HVALA NA PAŽNJI !



damir.jakus@fesb.hr

