

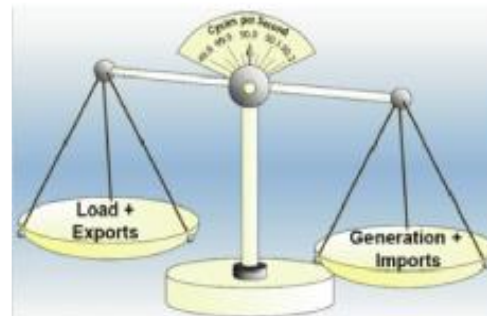
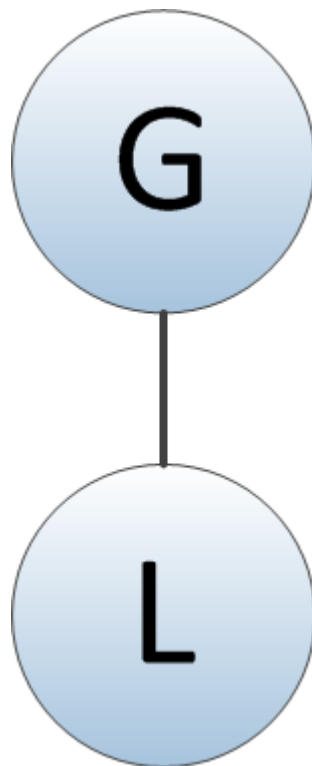
Pohrana električne energije nova značajka pogona distribucijskog sustava

dr. sc. Tomislav Capuder
Zavod za visoki napon i energetiku
Fakultet elektrotehnike i računarstva

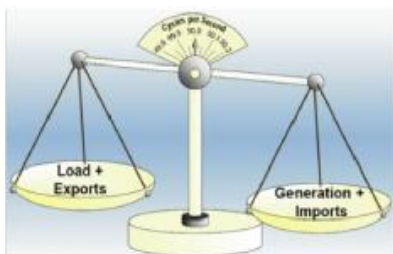
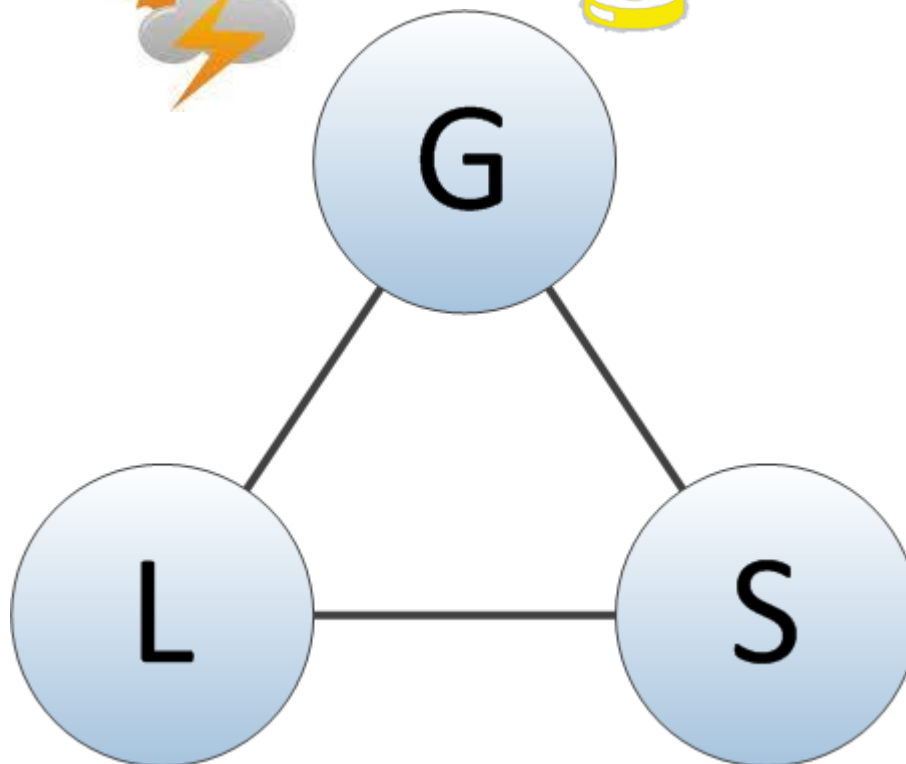
Sadržaj

- Spremnici i EES
- Usluge spremnika energije
- Baterijski spremnici u distribucijskim mrežama
- Više energijski sustavi – uloga toplinskih spremnika
- Zaključna razmatranja

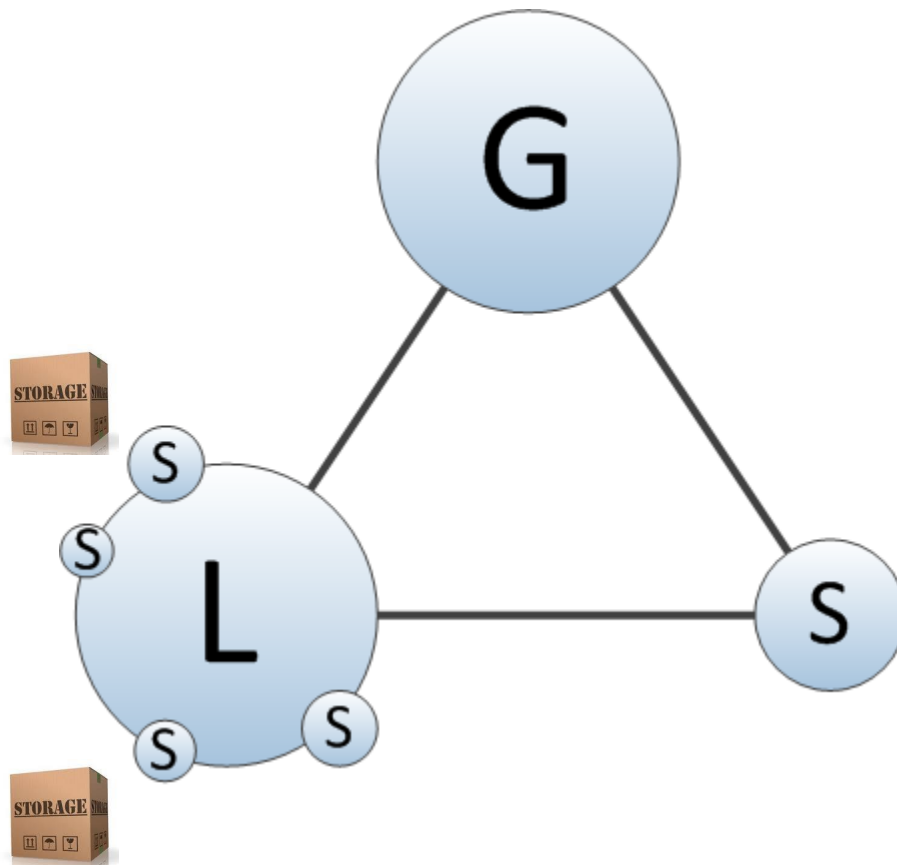
Spremnici i EES



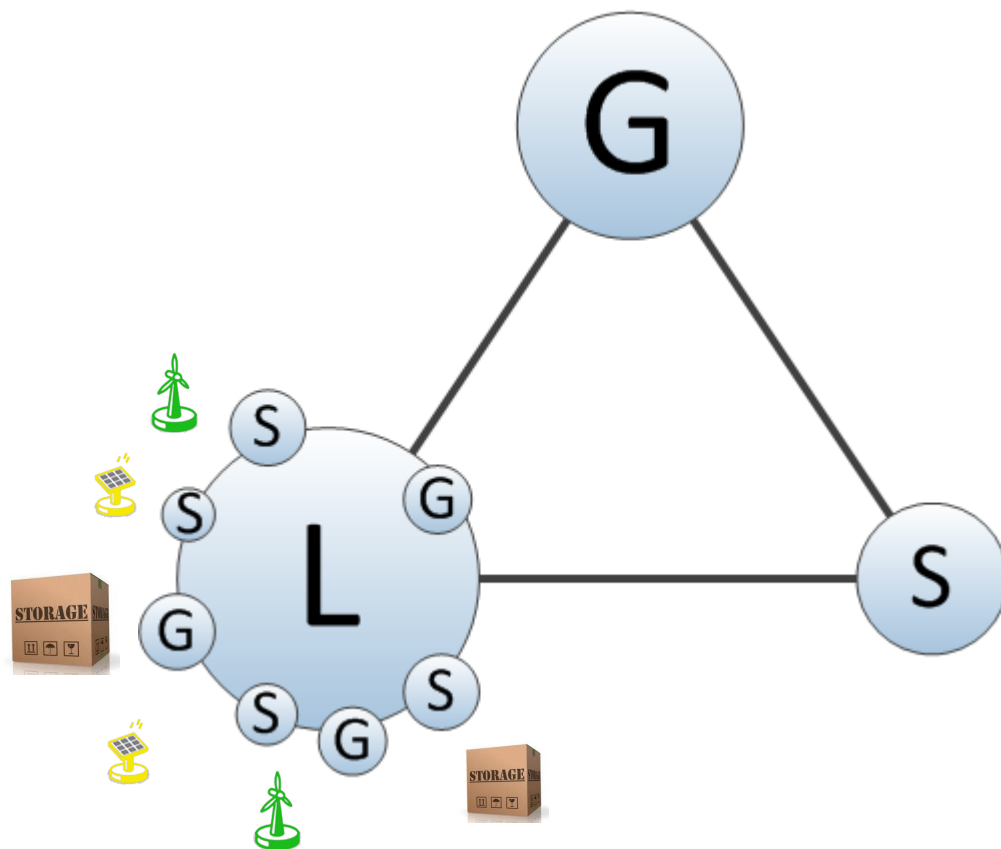
Spremnici i EES



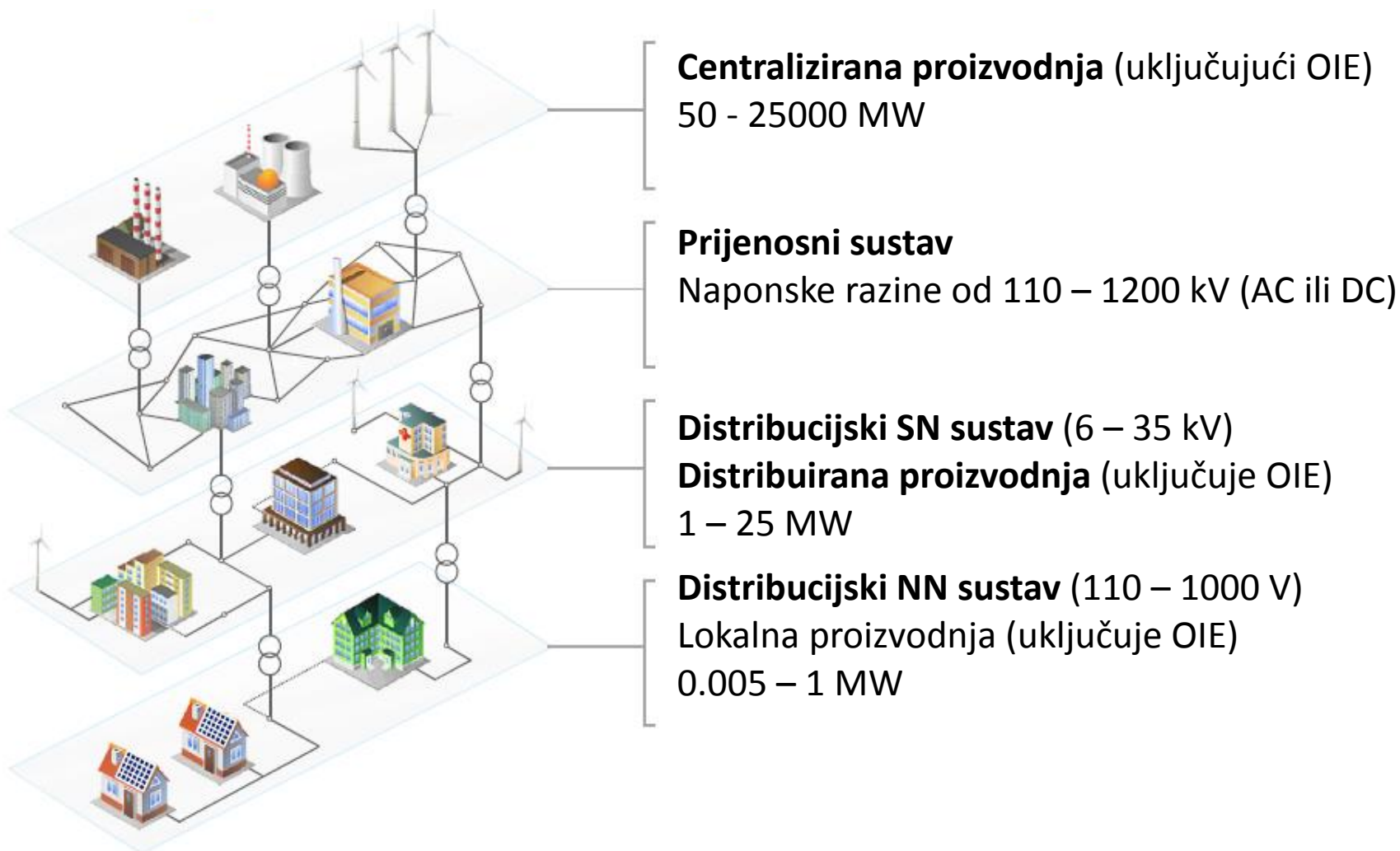
Spremnici i EES



Spremnici i EES



Uloga spremnika u EES-u



Uloga spremnika u EES-u

Uravnoteženje proizvodnje generatora

10-100 MW, 1-4 sata

Uravnoteženje u svrhu odgode investicije u prienosnu mrežu

10 – 100 MW, 1-4 sata

Regulacija frekvencije

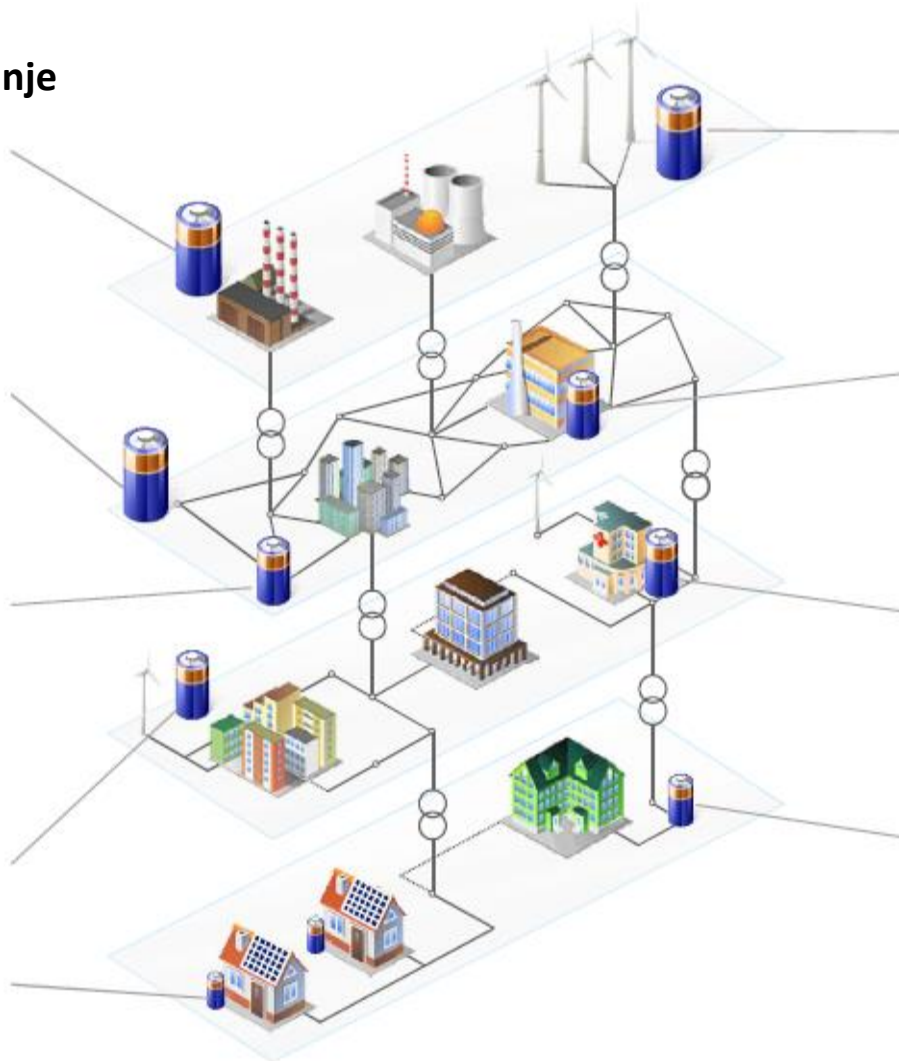
1-20 MW, 0.25-1 sat

Integracija OIE

1 – 10 MW, 1-6 sati

Upravljanje energijom krajnjeg kupca

1 – 10 MW, 1-6 sati



Uravnoteženje proizvodnje OIE

10 – 100 MW, 1-6 sati

„Rezanje” vršnog opterećenja,

1-10 MW, 1-2 sata

UPS za „osjetljive” kupce

1-10 MW, 0.1 – 1 sat

Lokalni spremnik

0.1-1 MW, 1-4 sata

Uloga spremnika u EES-u

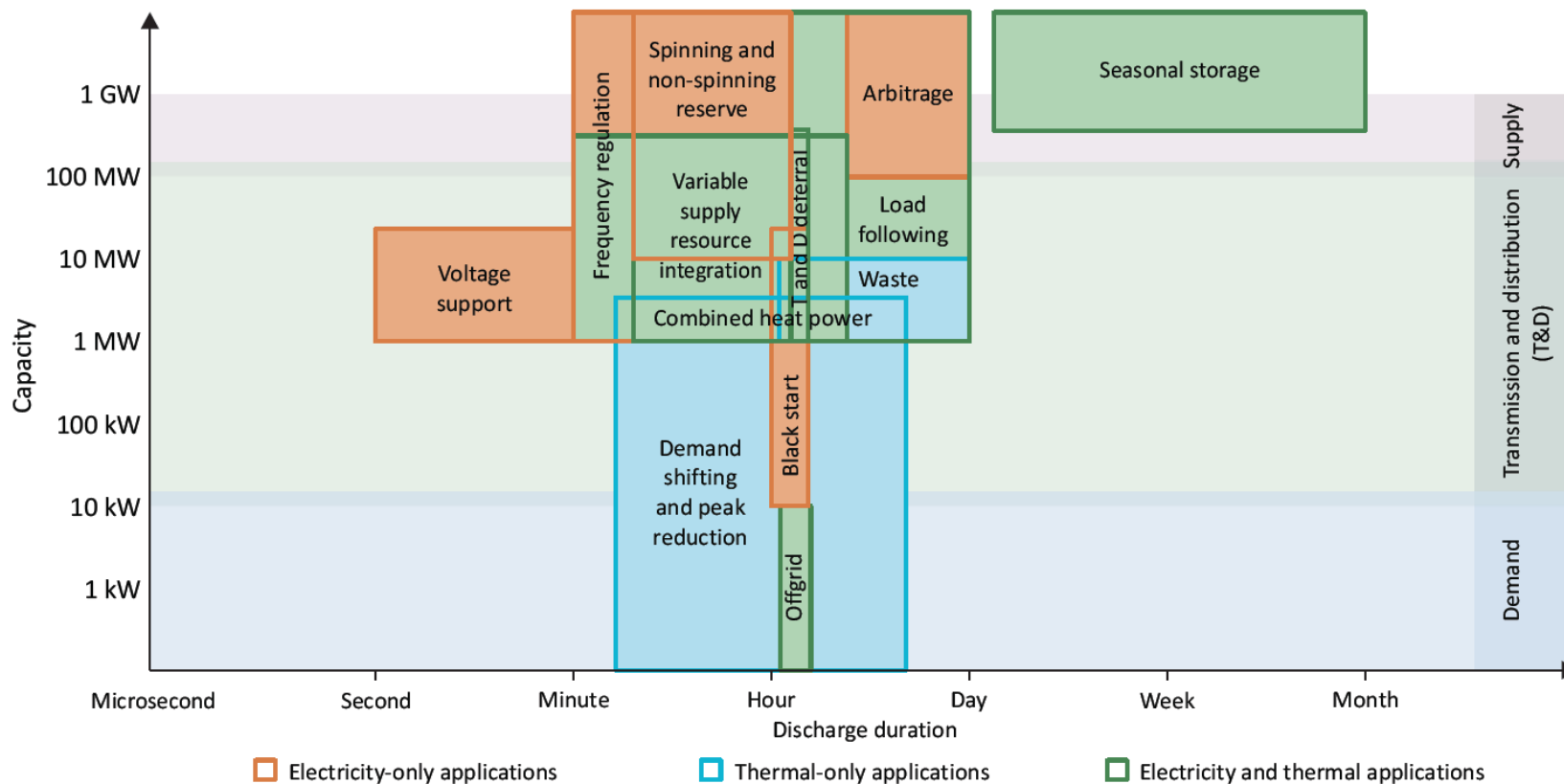
Mijenjaju li spremnici princip rada EES-a?

- Današnji EES:
 - Proizvodnja je u svakom trenutku jednaka potrošnji
 - Mali udio proizvodnje iz OIE
 - Fleksibilnost dolazi od strane upravljivih generatora (proizvodnje)
 - Visoki (i skupi) zahtjevi na sigurnost i stabilnost EES-a
- Budući EES (?):
 - Proizvodnja je u svakom trenutku jednaka potrošnji
 - EES s velikim udjelom OIE – velika varijabilnost i nepredvidljivost u proizvodnji
 - Spremnici energije pružaju usluge fleksibilnosti i regulacije u EES-u
 - Fleksibilnost od strane potrošača – distribuirane tehnologije (DI, spremnici, EV)

Uloga spremnika u EES-u

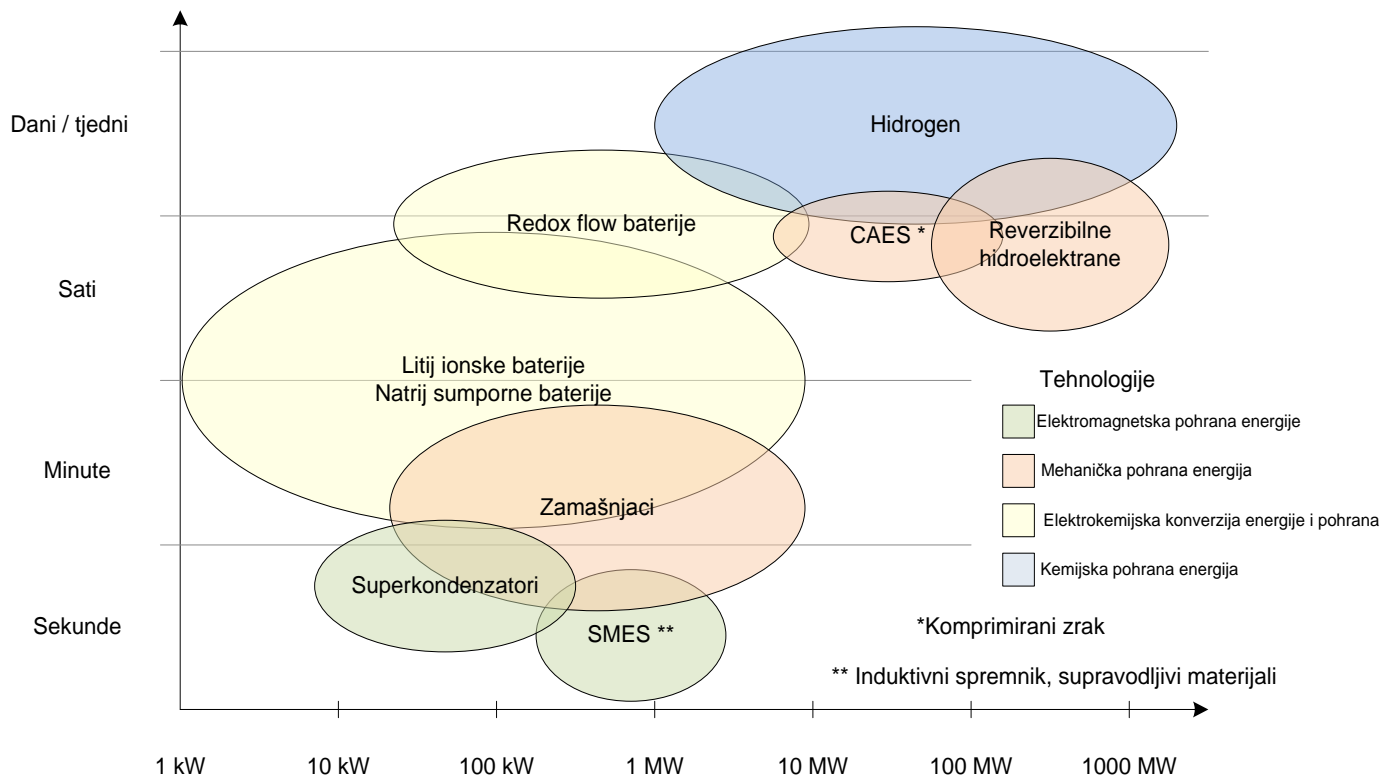
- Usluge koje spremnici mogu pružiti:
 - Arbitraža – premještaje opterećenja (skupo u jeftino)
 - Regulacija – problemi nesigurnosti i nepredvidivosti proizvodnje iz vjetra i sunca
 - Pomoć u održavanju sigurnosti sustava
 - Regulacija napona
- Neizravne usluge/benefiti:
 - Odgoda investicija u proizvodne i mrežne kapacitete
 - Niži troškovi održavanja generatora (manje varijacije u radnoj točki proizvodnje)
 - Smanjenje stakleničkih plinova

Uloga spremnika u EES-u



Uloga spremnika u EES-u

Sustavi pohrane energije prema trajanju i snazi



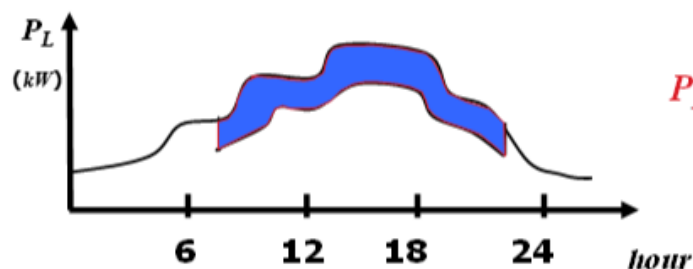
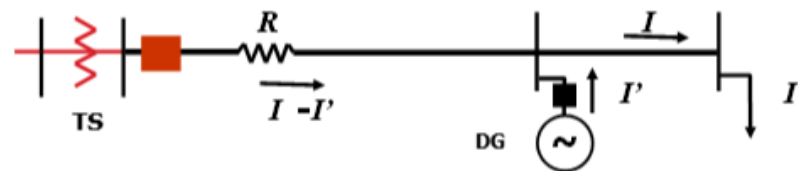
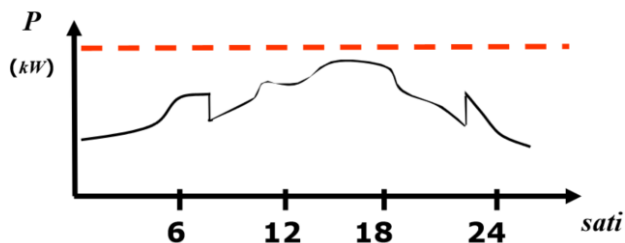
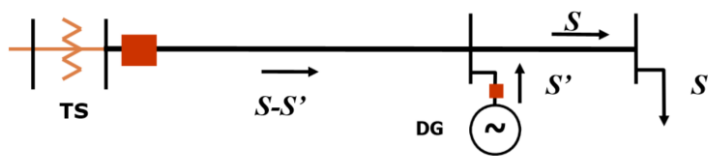
Uloga spremnika u EES-u

Spremnici i/ili mrežna infrastruktura

- Investicija u spremnik ili prijenosni/distribucijski vod?
 - Vodovi i dalje „pobjeđuju”
 - No pitanje je koliko dugo?
- Prilika za spremnike
 - Odgoda investicija u mrežnu infrastrukturu
- Koja je uloga operatora sustava u upravljanju spremnicima?
 - Privatni investitor je vlasnik spremnika
 - Operator sustava je vlasnik spremnika

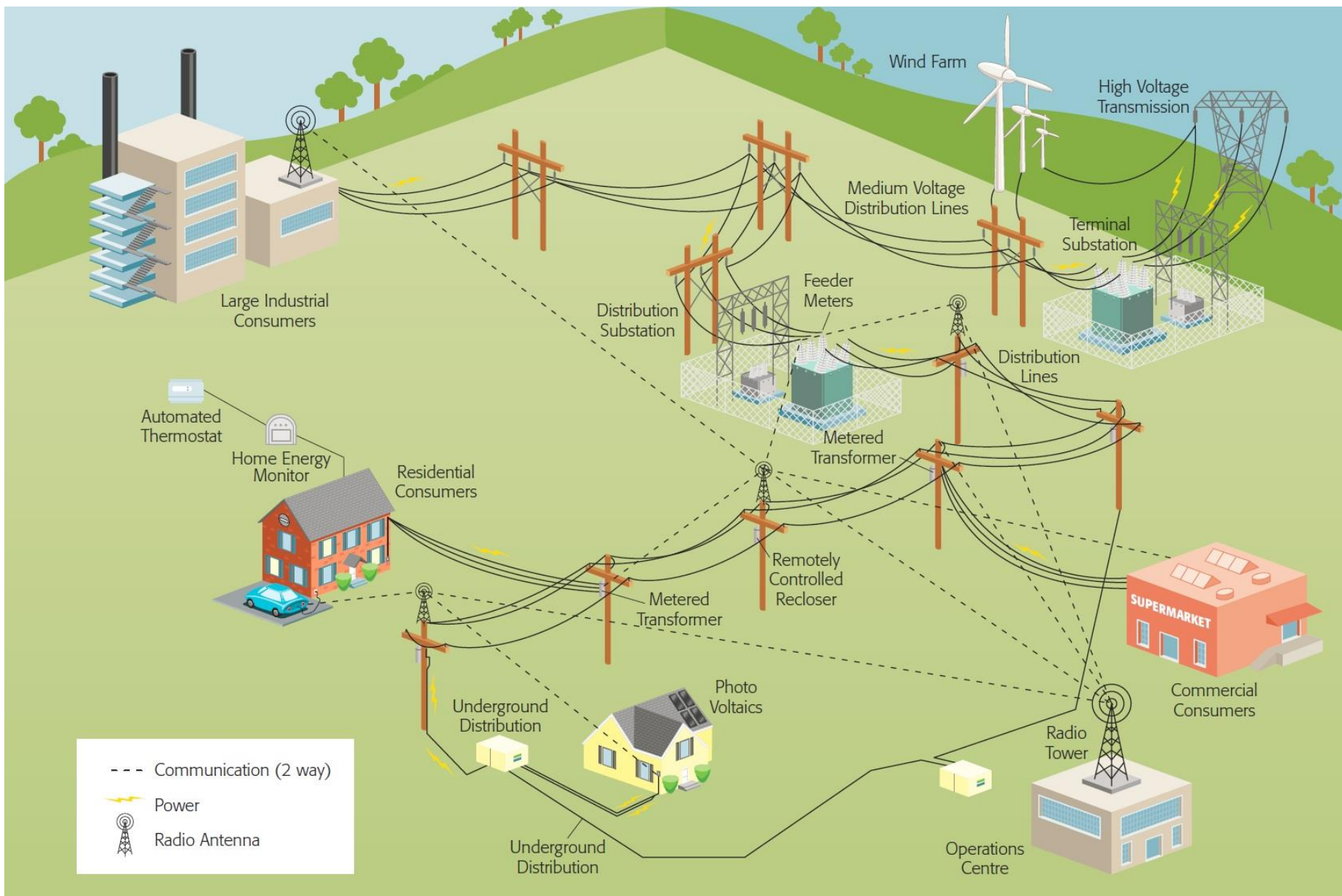
Baterijski spremnici u distribucijskim mrežama

- Novi izvori u distribucijskoj mreži
- DI, EV, elektrifikacija toplinskog sektora
- Utjecaj na
 - Naponske prilike
 - Opterećenje elemenata
 - Iznose gubitaka u distribucijskoj mreži

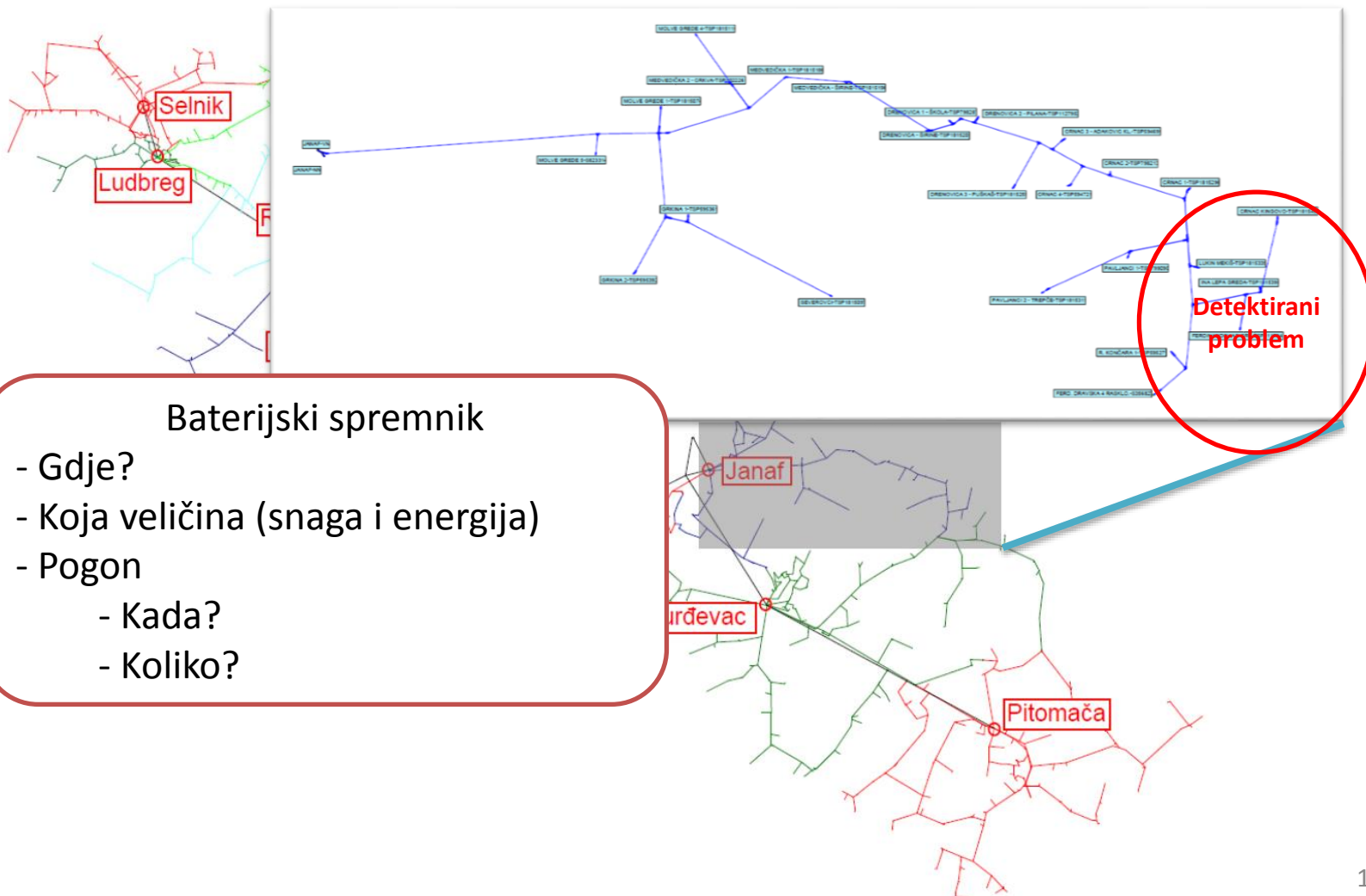


$$P_L = R \cdot |I|^2$$

$$P_L' = R \cdot (|I-I'|)^2$$



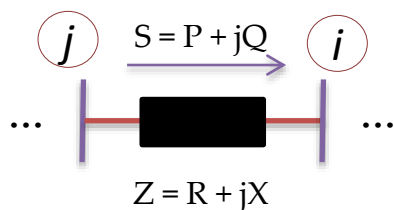
Baterijski spremnici u distribucijskim mrežama



Baterijski spremnik

- Gdje?
- Koja veličina (snaga i energija)
- Pogon
 - Kada?
 - Koliko?

- Kompleksan problem
 - Nelinearan (tokovi snaga)
 - NP težak (N lokacija za BS, neodređena snaga)
- Heurističke metode?



$$\underline{U_j^2(t)} = \underline{U_i^2(t)} - 2(P_{i-j}(t)R_{i-j} + Q_{i-j}(t)X_{i-j})$$

$$\underline{I_{i-j}^2(t)} \geq \frac{1}{\underline{U_i^2(t)}} (\underline{P_{i-j}^2(t)} + \underline{Q_{i-j}^2(t)})$$

Nelinearni problem



$$i_{i-j}(t) = I_{i-j}^2(t)$$

$$v_i(t) = U_i^2(t)$$

$$U_i^2(t) \approx 1$$

$$v_j(t) = v_i(t) - 2(P_{i-j}(t)R_{i-j} + Q_{i-j}(t)X_{i-j})$$

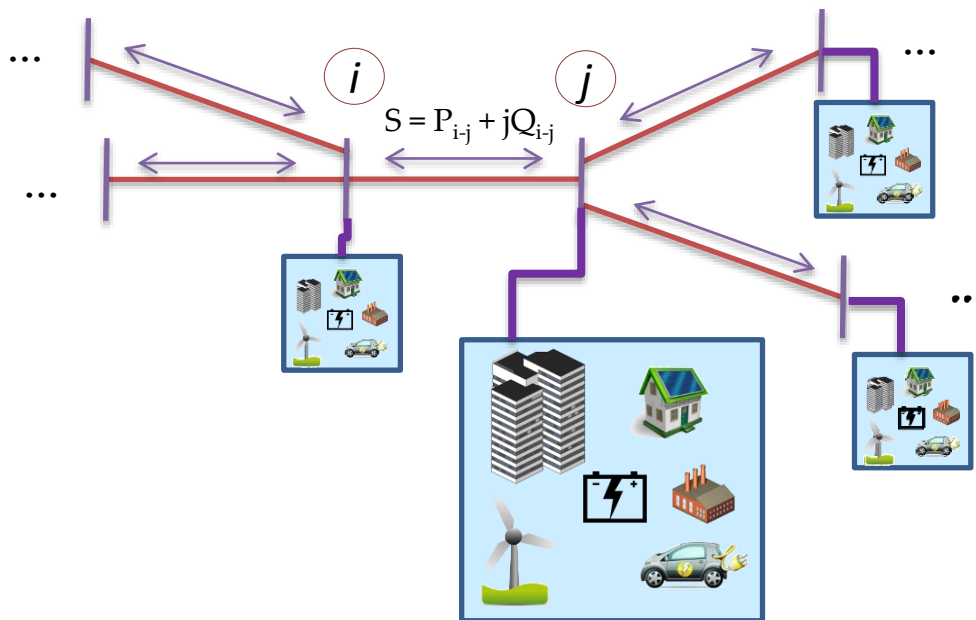
Linearna ograničenja

$$i_{i-j}(t) \geq P_{i-j}(t)^2 + Q_{i-j}(t)^2$$

Second Order Cone constraint



- U „aktivnim” distribucijskim mrežama smjera toka snage/energije može biti u oba smjera



$$P_{i-j}(t) = P_{load}(j, t) - P_{DG}(j, t) - P_{ESS}(j, t) + i_{i-j}(t)R_{i-j} + \sum_{j=m} P_{m-n} - \sum_{j=n} P_{m-n} \quad P_{i-j}(t) \in (-\infty, +\infty)$$

$$Q_{i-j}(t) = Q_{load}(j, t) - Q_{DG}(j, t) - Q_{ESS}(j, t) + i_{i-j}(t)X_{i-j} - v_i(t)Bsh_{i-j} + \sum_{j=m} Q_{m-n} - \sum_{j=n} Q_{m-n} \quad Q_{i-j}(t) \in (-\infty, +\infty)$$

Baterijski spremnici u distribucijskim mrežama

Baterije u distribucijskim mrežama:

- SCOP kao učinkoviti algoritam za integraciju, pogon i planiranje utjecaja BS, PV, EV na distribucijsku mrežu
- Vrlo dobro poklapanje sa rezultatima komercijalnih softwera (npr. NEPLAN)
- Što se događa kada/ako dođe do:
 - Integracije značajnog broja EV, SE, DT?
 - Smanjenja cijena BS
 - Ograničeni budžet ODS za investicije u novu mrežnu infrastrukturu
- Osvrt na promjenu Zakona o OIE
 - Bilančne grupe
 - Odstupanje proizvodnje – kazna (više od 10%)!
 - Potencijal za BS!?

Investicije u baterijske spremnike

- Različiti izvori, različite cijene:
- Investicija u baterijski spremnik ili vod
 - „Rezanje” vršnog opterećenja, trajanje (energija) 1-2 sata
 - Energija spremnika ~ snaga spremnika
 - NN vod ~ 25-30 €/kVA po km plus radovi

Tehnologija	Učinkovitost (%)	Ener. gustoća (Wh/kg)	Invest. cost (€/kW)	Invest. cost (€/kWh)
Pb	70-90	30-50	350	300
Na-S	80-90	150-240	370	300
Na-Ni-Cl	85-90		480	500
Ni-Cd	60-65	50-75	250	780
Li-ion	85-90	75-200	450	800
VRFB	85-90		500	460

Izvor cijena:

- Evans, Strezov, Evans: *Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012
- http://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_pricing#cite_note-2

Investicije u baterijske spremnike

Cijene EE od opskrbljivača:

- Hrvatska = 16 c€/kWh; Njemačka = 33 c€/kWh, Danska = 37.5 c€/kWh

OIE (PV) i baterijski spremnici:

- Strategija brojnih PV proizvođača (SMA) ali i opskrbljivača (EoN)
- Cijena proizvodnje EE iz PV u Njemačkoj 12 c€/kWh
- Pad cijena spremnika (25% od proljeća 2014.) – 15000 kućanstava PV-BS

Utjecaj PV+BS na pogon distribucijske mreže

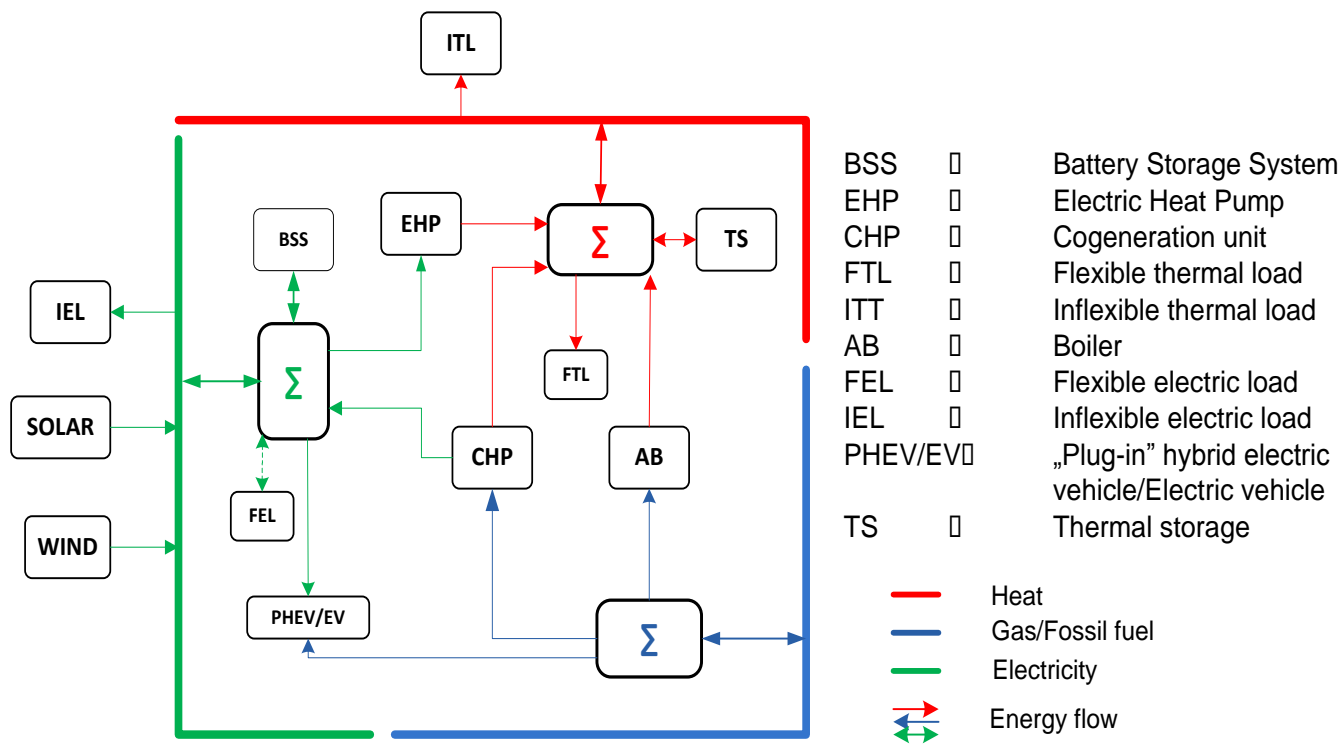
- Manje varijacije opterećenja vodova (većina potrošnje na lokaciji)
- Manje varijacije napona (dodatno: veća mogućnost regulacije napona)

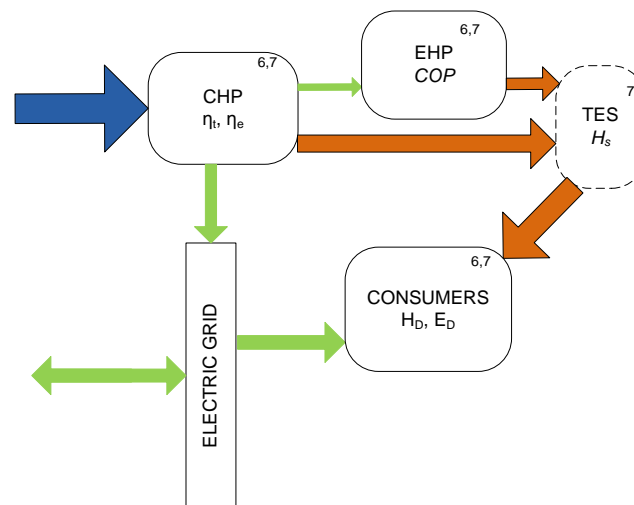
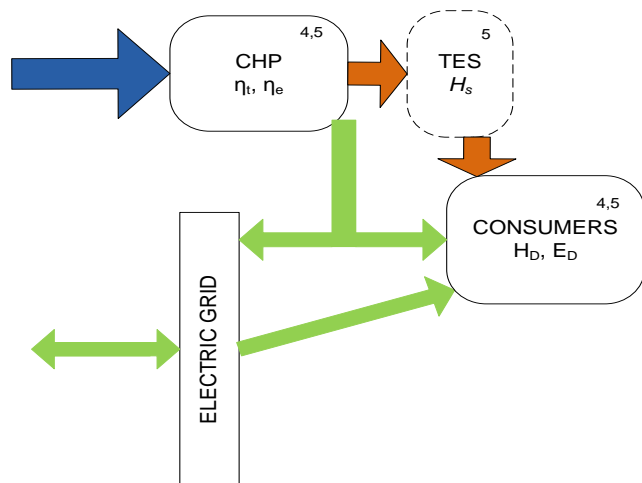
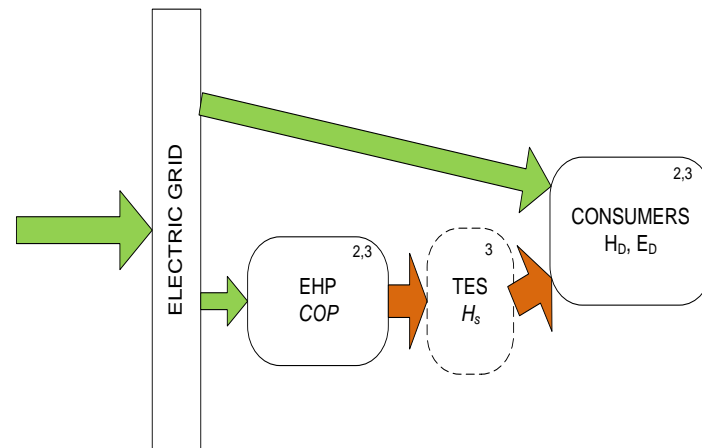
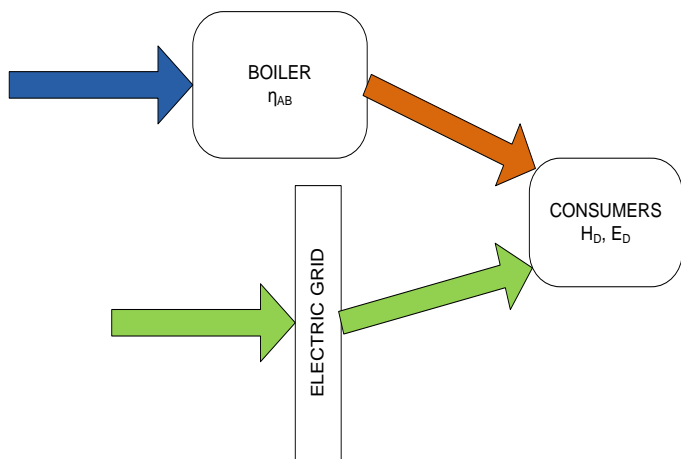
Izvor cijena:

- Evans, Strezov, Evans: *Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012
- http://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_pricing#cite_note-2

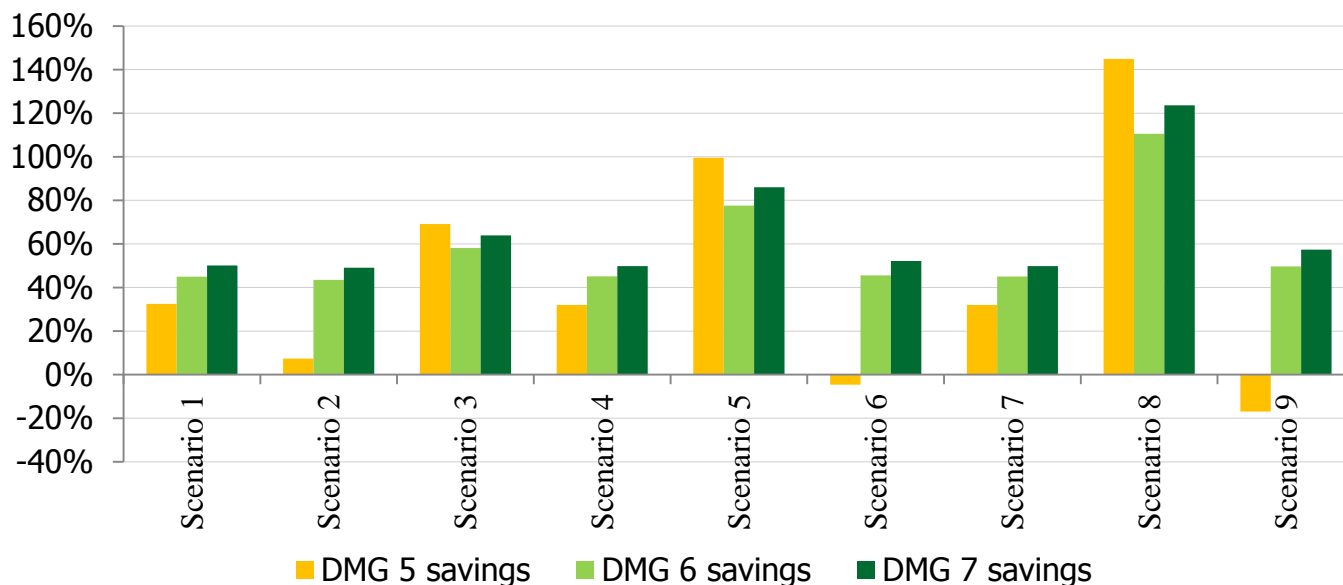
Više energijski sustavi – potencijal toplinskih spremnika

- Interakcija više energetske infrastrukture
- Više energijski sustavi





Tip DMG	Troškovi pogona (€/god)	Razlika (%)
Plinski bojler i EES	625,440.00	-
DT i EES	479,599.00	-23.32
DT+TS i EES	425,412.00	-31.98
CHP	462,691.00	-26.02
CHP+TS	422,436.00	-32.46
CHP+DT	342,684.00	-45.21
CHP+TS+DT	312,198.00	-50.08



Više energijski sustavi – potencijal toplinskih spremnika

Fleksibilni više energijski sustavi:

- Toplinski spremnici kao izvor fleksibilnosti – odgovor na signale sa tržišta ili na zahtjeve ODS
- Električna energije se „sprema” u TS
- Uštede u pogonu veće od 50%
- Smanjenje emisija CO₂ i do 40%

Zanimljivost:

- *Sunna Project* – operator sustava daje besplatne grijače vode (električne bojlere) kojima onda ODS upravlja onima koji instaliraju SE
- Upravljiva potrošnja na mjestu proizvodnje

Zaključna razmatranja

- Spremnici kao rješenje za varijabilnost i nesigurnost proizvodnje OIE (?!)
- Različiti tipovi (tehnologije) spremnika mogu pružiti različite usluge
- Baterijski spremnici danas neisplativi
- Spremnici kao vlasništvo operatora sustava
 - Odgoda investicija u vodove
 - Održavanje tehničkih zahtjeva/ograničenja mreže
- Više energijski fleksibilni sustavi – „pohrana električne energije u toplinske spremnike”
 - Pogonske uštede, smanjenja emisija CO₂
 - Fleksibilni odgovor jedinica na signale s tržišta i/ili od operatora sustava

Literatura:

- Capuder, Tomislav; Mancarella, Pierluigi „*Techno-economic and environmental modelling and optimization of flexible distributed multi-generation options*”, Energy (Oxford). 71 (2014) ; 516-533
- Zidar, Matija; Capuder, Tomislav; Georgilakis, Pavlos; Škrlec, Davor „Convex AC Optimal Power Flow Method for Definition of Size and Location of Battery Storage Systems in the Distribution Grid” , 9th SDEWES conference
- Nick M., Cherkaoui R., Paolone M. „*Optimal Allocation of Dispersed Energy Storage Systems in Active Distribution Networks for Energy Balance and Grid Support*”, IEEE Transactions on Power Systems, September 2014
- Alberto Borghetti „*Using mixed integer programming for the volt/var optimization in distribution feeders*”, Electric System Power Research 2013
- G. Dellile, B. Francois, G. Malarange, J. Fraisse „*Energy storage systems in distribution grids: new assets to upgrade distribution networks abilities*”, CIRED 2009
- M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi, D.Sutanto „*Mitigation of Rooftop Solar PV Impacts and Evening Peak Support by Managing Available Capacity of Distributed Energy Storage Systems*”, IEEE Transactions on Power Systems 2013
- Ye Yang, Hui Li, A. Aichhorn, J. Zheng, M. Greenleaf „*Sizing Strategy of Distributed Battery Storage System With High Penetration of Photovoltaic for Voltage Regulation and Peak Load Shaving*”, IEEE Transactions on Smart Grids 2014
- Electric Power Research Institute „*Electricity Energy Storage Technology Options*”, White paper 2010
- U.S. Department of Energy „*Grid Energy Storage*”, 2013
- www.batteryuniversity.com

Literatura:

- A. Evans, V. Evans, T. Evans: „*Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetrations*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012
- K. Goda, M. Kitsuregawa: „*The History of Storage Systems*”, Proceedings of IEEE 2012
- Energy Research Partnership Technology Report: „*The future role for energy storage in the UK*”, Main report 2011
- Sandia report „*Long vs Short-Term Energy Storage Technology Analysis*”, 2003
- X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke „*Overview of the current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*”, Applied energy 2014
- B. Zakeri, S. Syri „*Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015
- Sandia Report „*DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*”, Sandia National Laboratories 2013
- D. Linden, T. Reddy „*Handbook of batteries*”, McGraw-Hill Handbooks
- US Department of Energy „*Analytic Challenges to Valuing Energy Storage*”, Workshop Report 2011
- RWTH Aachen „*Technology Overview on Electricity Storage*”, 2012
- Hrvoje Pandžić, Yishen Wang, Ting Qui, Yury Dvorkin, and Daniel Kirschen. *Near-Optimal Method for Siting and Sizing of Distributed Storage in a Transmission Network*, IEEE Transactions on Power Systems 2015.

Zahvala:

Matija Zidar, doc. dr. sc. Hrvoje Pandžić, izv. prof. dr. sc. Marko Delimar