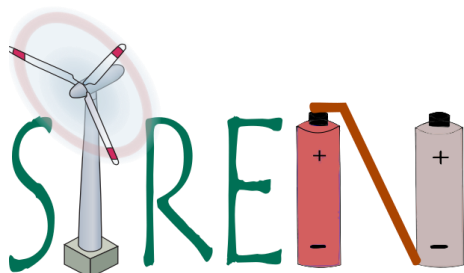


DISTRIBUIRANI PRUŽATELJI USLUGA FLEKSIBILNOSTI

Hrvoje Pandžić
Fakultet elektrotehnike i računarstva

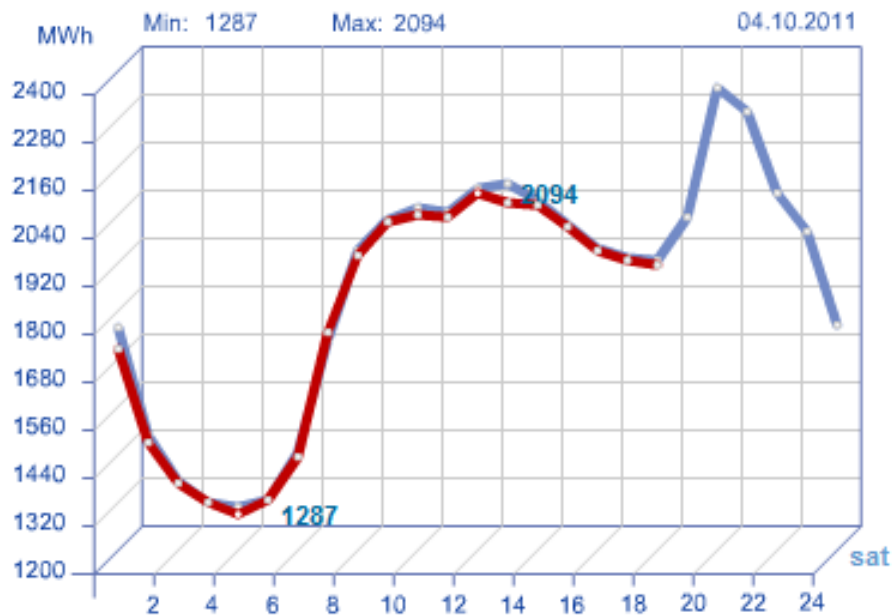
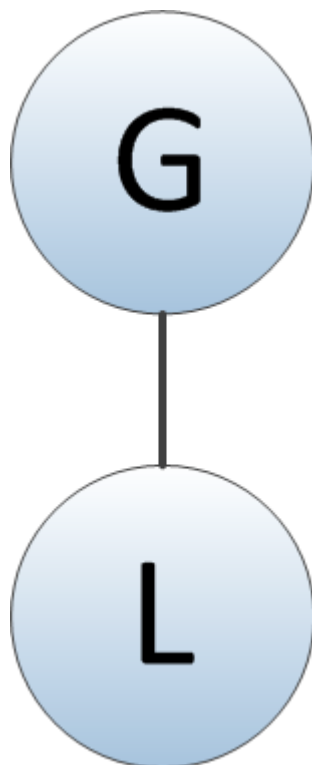


Zagreb, 11. svibnja 2017.

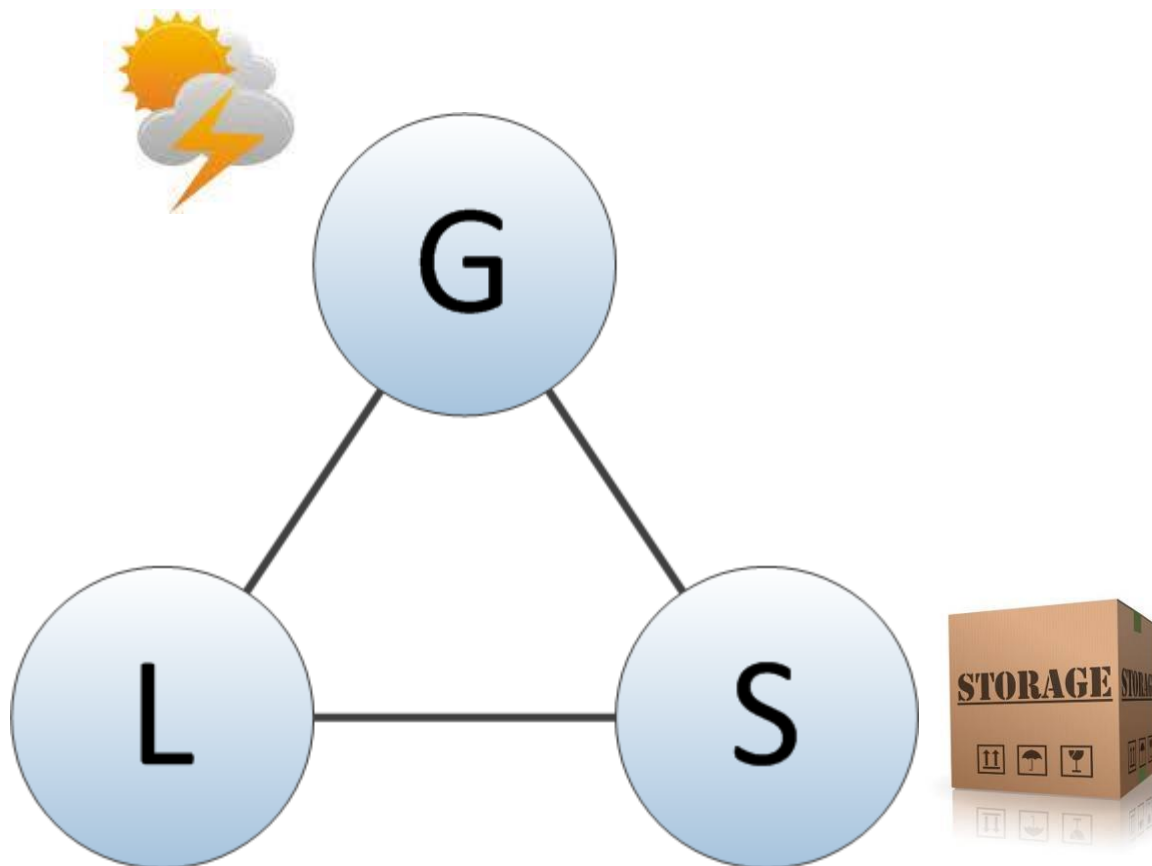
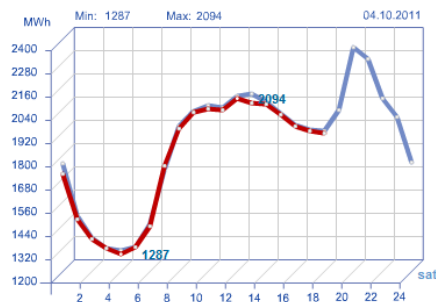
SADRŽAJ

- TEHNIČKE ZNAČAJKE PRUŽATELJA USLUGA FLEKSIBILNOSTI
- TRŽIŠNI ASPEKTI I OGRANIČENJA
- DEMONSTRACIJSKI I PILOT PROJEKTI

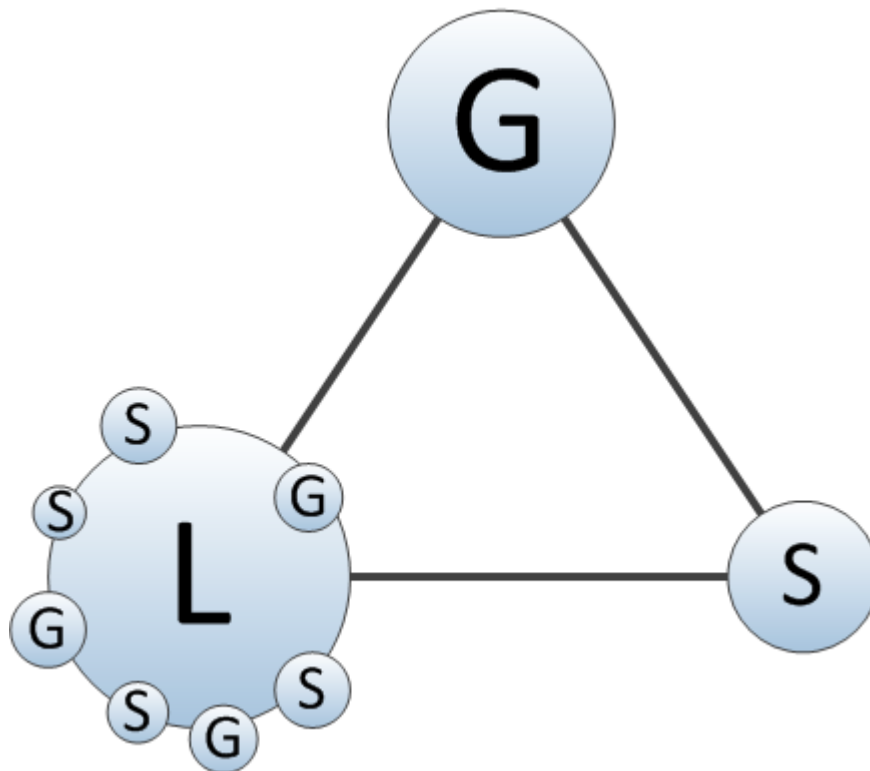
Nekad davno...



Nekad ne tako davno...



Danas...

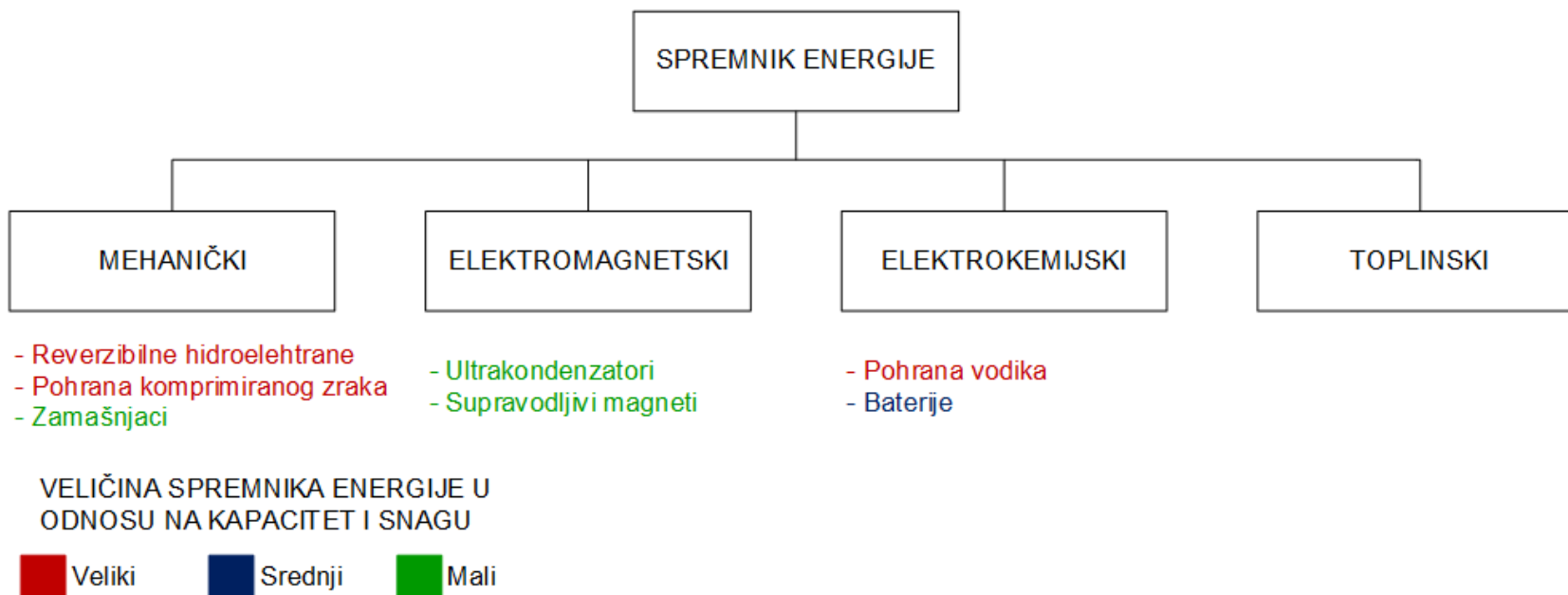


Distribuirani pružatelji usluga fleksibilnosti

- Distribuirani generatori (OIE, plinske turbine, CHP, Diesel agregati, ...)
- Stacionarni spremnici energije
- Električna vozila
- Upravljiva potrošnja

Spremnici energije

Klasifikacija spremnika energije



izvor: M. Świerczyński, "Lithium ion battery energy storage system for augmented wind power plants", Dissertation submitted to Faculty of Engineering, Science, and Medicine at Aalborg University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Aalborg University, Department of Energy Technology, Aalborg, Denmark, October, 2012

Stacionarne baterije

- Prebacivanje potrošnje iz više u nižu tarifu
- Smanjenje mjesečne angažirane snage

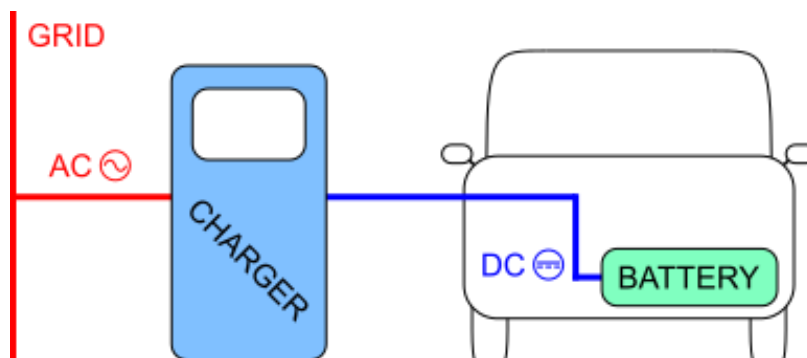
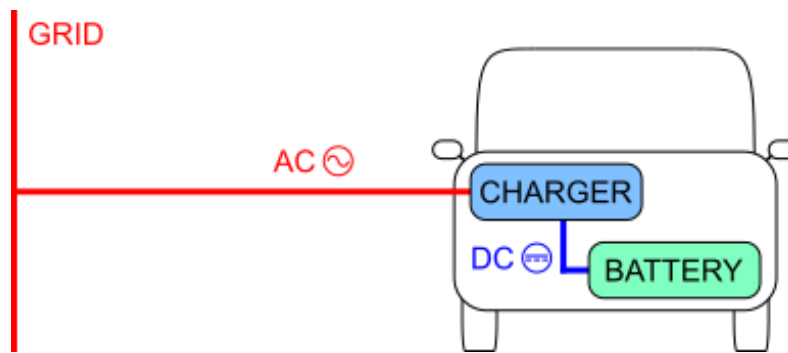
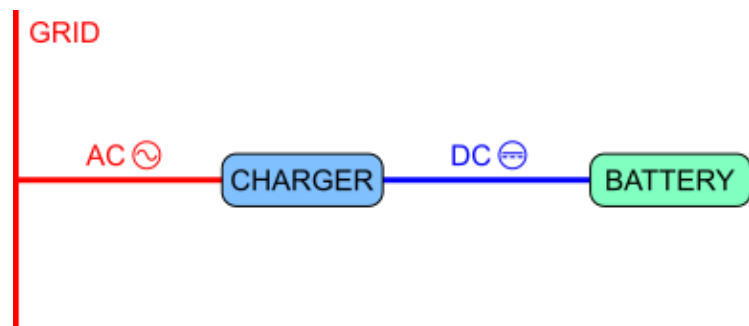


Općenito o električnim vozilima (EV)

- Baterijska električna vozila (BEV)
- Karakteristike baterija
- Usporedba s vozilima koja koriste motore s unutrašnjim izgaranjem:
 - **Prednosti BEV**
 - nema emisija CO₂ i ostalih štetnih plinova
 - jednostavnija mehanika i održavanje
 - dobre vozne performanse (ubrzanje, kočenje)
 - **Nedostaci BEV**
 - kraći doseg
 - dugo razdoblje punjenja baterija
 - viša cijena

Punjenje BEV

- AC vs. DC
- **Punjač**
 - AC/DC pretvarač
 - jednosmjerni
 - dvosmjerni
- **AC punjenje**
 - punjač unutar vozila
 - „sporo” punjenje
- **DC punjenje**
 - punjač izvan vozila
 - „brzo” punjenje



Punjive baterije (1)

Najraširenije tehnologije:

- **olovne baterije**
- **baterije temeljene na niklu (Ni):**
 - nikal-kadmij (NiCd)
 - nikal-metal-hidrid (NiMh)
- **litij-ionske baterije (Li-ion)**
- **Glavne karakteristike:** napon i kapacitet
- **Kapacitet** – amper-sati (Ah) ili vat-sati (Wh)
 - npr. baterija nazivnog kapaciteta 10 Ah može dati:
 - struju od 10 A u trajanju 1 h
 - struju od 5 A u trajanju 2 h, itd.
 - iznos kapaciteta smanjuje se s vremenom i korištenjem baterije
- Sve punjive baterije imaju ograničen životni vijek

Punjive baterije (2)

C-rate=brzina punjenja/pražnjenja baterije

- 1C odgovara vrijednosti Ah, npr.:
 - 1C za bateriju od 10 Ah = 10 A
 - 2C za bateriju od 10 Ah = 20 A
- **State-of-charge (SOC) (%)** = ukupna količina energije koja je preostala u bateriji
- U potpunosti napunjena baterija ima SOC u iznosu od 100 %
- **State-of-health (SOH) (%)** = veličina koja definira sveukupno stanje baterije
- Nova zdrava baterija ima SOH u iznosu 100%
- Pokazatelji vrijednosti SOH:
 - kapacitet
 - unutarnji otpor
 - samopražnjenje

Modeliranje baterija

- Standardno u znanstvenoj literaturi (linearni model):

$$SOC_t = SOC_{t-1} + s_t^{\text{ch}} \cdot \eta^{\text{ch}} - \frac{s_t^{\text{dis}}}{\eta^{\text{dis}}}, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$SOC^{\min} \leq soc_t \leq SOC^{\max}, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$s_t^{\text{ch}} \leq S_t^{\text{ch,max}} \cdot h_t, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$s_t^{\text{dis}} \leq S_t^{\text{dis,max}} \cdot (1 - h_t), \quad \forall t \in \Omega^T$$

Modeliranje baterija

- Model degradacije baterije (linearni model):

$$\sum_{t \in T_d} \sum_{j \in J} \frac{1}{4500} C_j^{\text{SE,IN}} \left(s_{jtw}^{\text{D}} + \sum_{k \in K} \tau_k (s_{jtwk}^{\text{D,PC}} - s_{jtw}^{\text{D}}) \right)$$

Eksperimentalno istraživanje

- Sva moderna električna vozila koriste litij-ionske baterije
- Eksperimentalno istraživanje karakteristika litij-ionskih baterija
 - punionice
 - stanice za zamjenu baterija
- 18650 litij-ionske ćelije
 - laptopi
 - Tesla model S

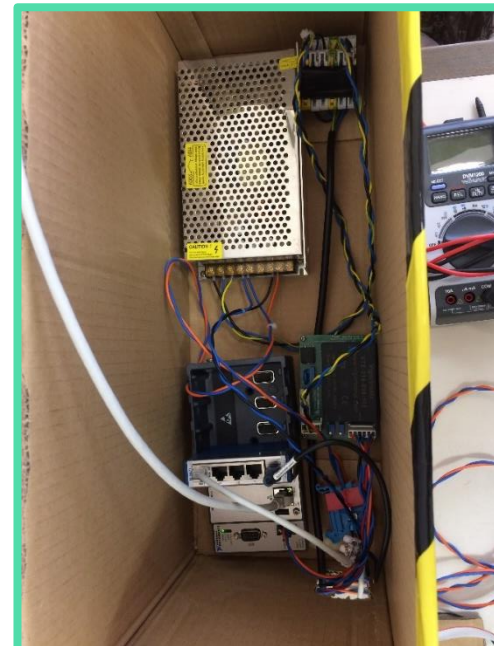
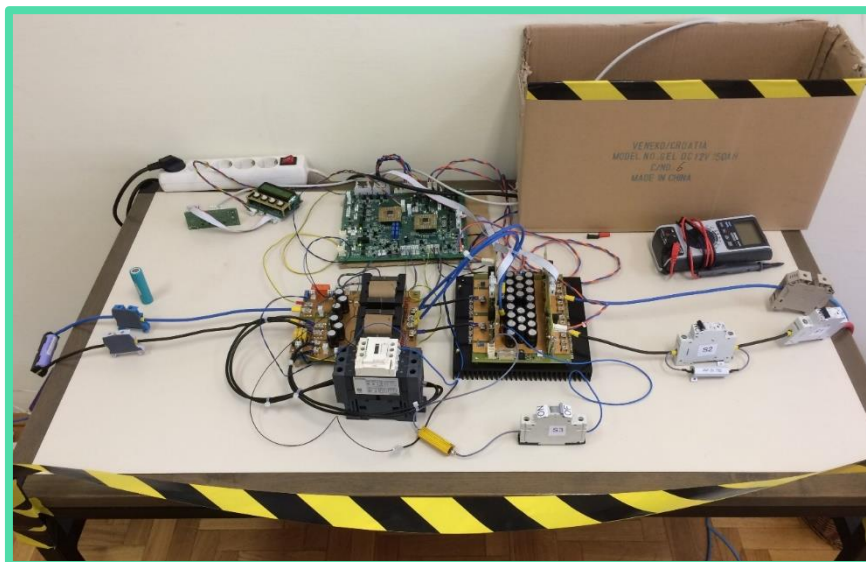
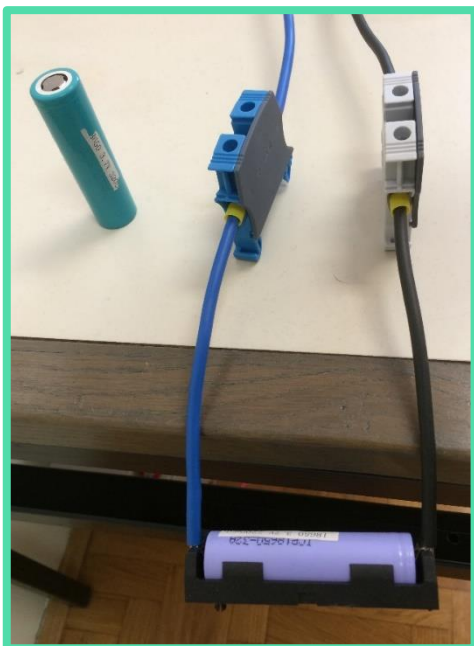
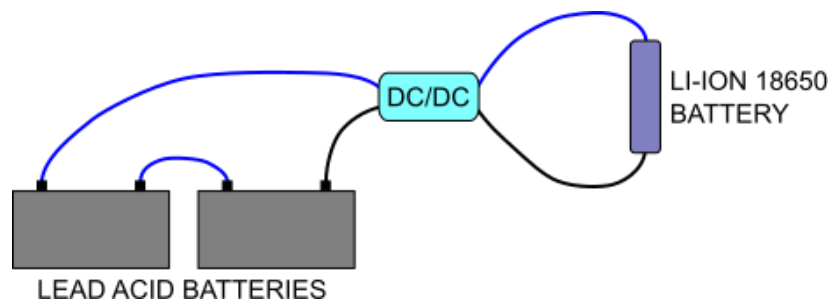


Pretvarač (1)

- Posebno napravljeni dvosmjerni AC/DC pretvarač za punjenje/pražnjenje baterija korištenih u eksperimentu
- Specifikacije:
 - nazivna izlazna snaga: 1 kW
 - izlazni napon: 0-20 VDC
 - izlazna struja: -50 do 50 ADC
 - ulaz: 50 Hz, 230 VAC
 - ulazno/izlazna mjerenja napona i struje
 - analogni signali 0-10 VDC
 - digitalni signali preko izoliranog USB-a ili RS-485
- Komunikacije i upravljanje – NI LabVIEW

Pretvarač (2)

- Konfiguracija korištena tijekom eksperimenta



Pretvarač (3) - SCADA

The SCADA interface displays the following components:

- Control Buttons:**
 - CONVERTER OFF ON (Red indicator)
 - CONTACTOR OPERATION MODE MANUAL AUTO (Red indicator)
 - CONTACTOR (MANUAL) OFF ON (Green indicator)
 - CLEAR ERROR OFF ON (Green indicator)
 - STOP VI (Red button)
 - LOGGING (Green button)
- DC link voltage:** 25,38 V (Gauge: 20-30 V)
- Output voltage (top):** 4,35 V (Gauge: 0-20 V)
- Output voltage (middle):** 4,24 V (Gauge: 0-20 V)
- Battery voltage:** 4,24 V (Gauge: 2,5-4,5 V)
- Output current (top):** 3,2 A (Gauge: -5 to 5 A)
- Output current (middle):** 3,21 A (Gauge: -5 to 5 A)
- Converter state:** STARTED
- Active controller:** CURRENT
- Error indicator:** NONE
- CRC error:** 0
- Temperature:** 26,1 C (Gauge: 0-80 C)

AUTOMATICALLY DISCONNECT BATTERY (TURN OFF CONTACTOR)

Function	Reset	Activate protection	Set threshold	Measured value	Contactor off
End voltage (discharge cut off)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2,75 V	4,24 V	<input checked="" type="checkbox"/>
End current (charge cut off)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0 A	3,22 A	<input checked="" type="checkbox"/>
Timer	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	60 min	21,9 min	<input checked="" type="checkbox"/>

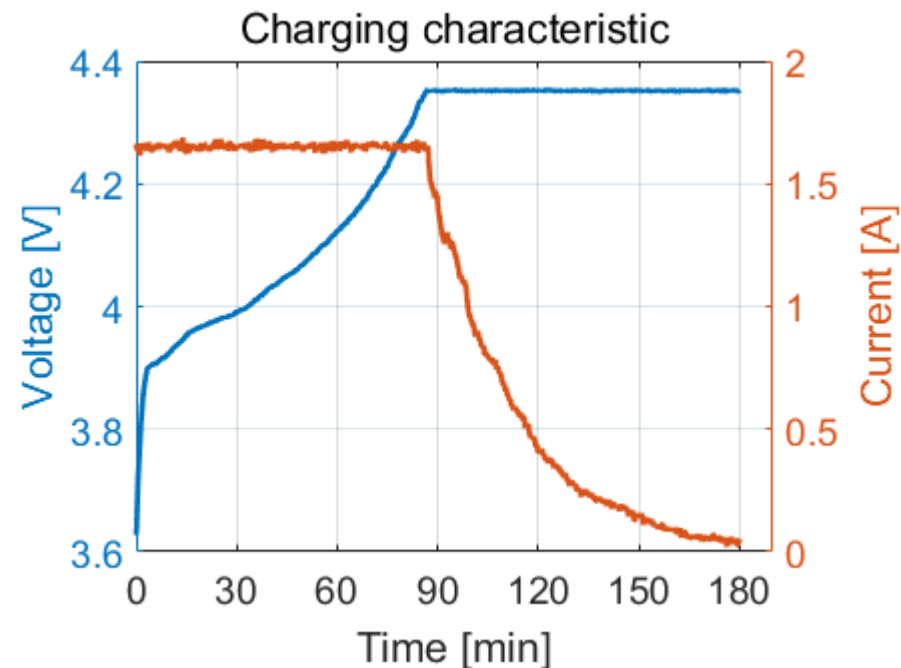
Eksperimenti

- Samsung ICR18650-32A
- Kemijska struktura: litij-kobaltov-oksidi (LiCoO₂)
 - nazivni napon: 3,75 V
 - nazivni kapacitet: 3,2 Ah
 - minimalni kapacitet: 3,1 Ah
- Snimljene karakteristike baterije
 - punjenja
 - standardnim punjenjem (0,5C)
 - brzim punjenjem (1C)
 - pražnjenja
 - state-of-charge (SOC)



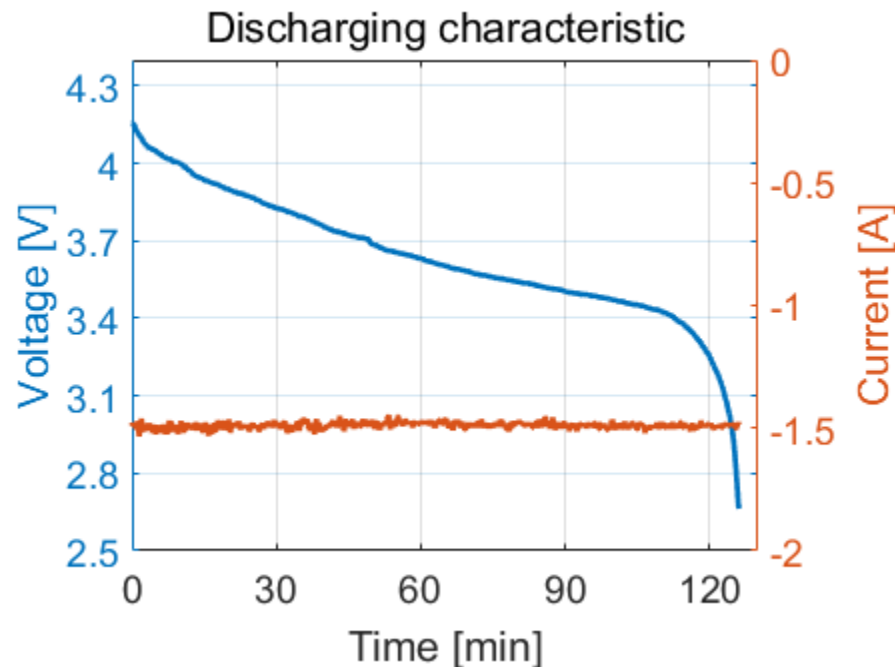
Karakteristika punjenja

- CC/CV punjenje – punjenje prvo konstantnom strujom dok napon ne dosegne maksimalnu vrijednost te nakon toga dolazi do postepenog padanja struje što dovodi do završetka ciklusa punjenja baterije
- **Podesivi parametri:**
 - konstantna struja punjenja
 - granica napona
 - struja odvajanja (prekida punjenja)
- **Uvjeti tijekom punjenja:**
 - konstantna struja: 1,6 A (0,5C)
 - granica napona: 4,35 V
 - trajanje punjenja: 180 min



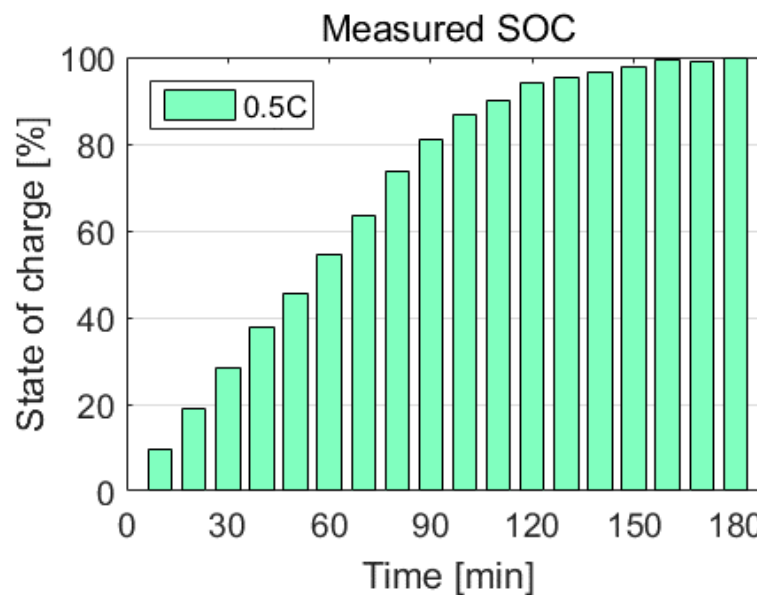
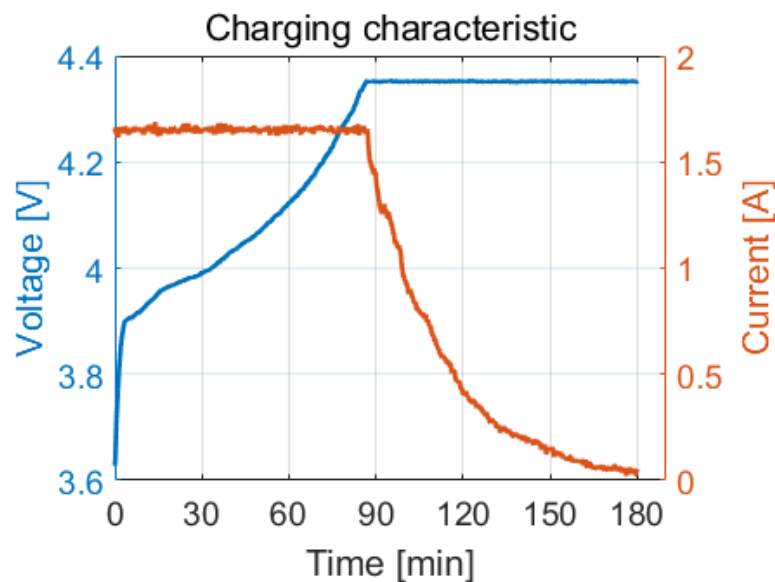
Karakteristika pražnjenja

- Uvjeti tijekom pražnjenja:
 - konstantna struja: 1,6 A (0,5C)
 - napon prekida pražnjenja: 2,75 V
- **Kulonovo brojanje**
 - integracija struje pražnjenja
 - dobiveni kapacitet: 3,08 Ah
 - što je niža struja pražnjenja, to se više Ah uspije izvući
 - specificirani nazivni kapacitet je dobiven s nižom strujom pražnjenja u iznosu od 0,2C



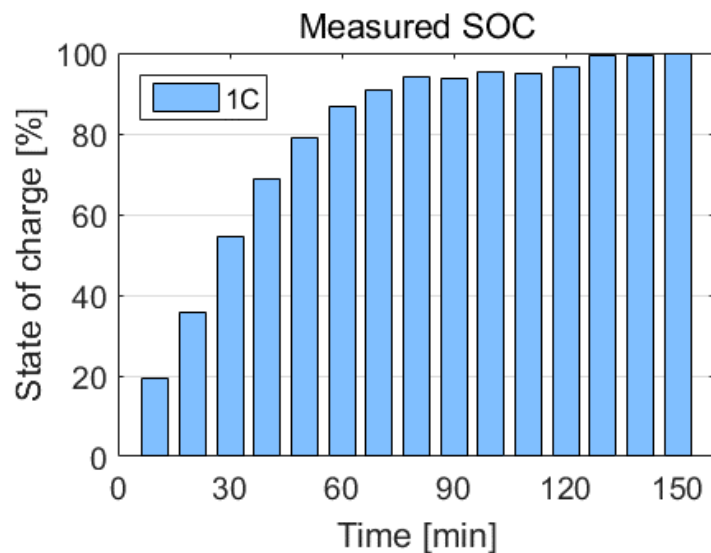
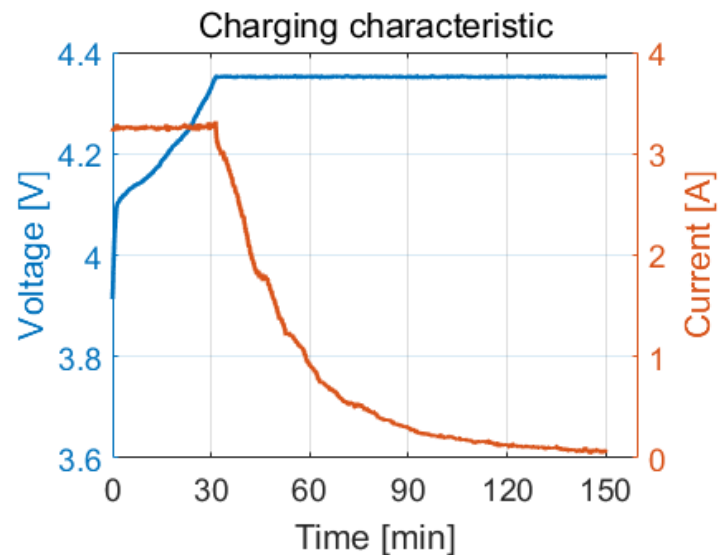
Karakteristika pražnjenja

- SOC mjeren u odnosu na vrijeme punjenja
- primjenjeni su nizovi parcijalnih punjenja (koraci od 10 min) praćeni s pražnjenjem – 18 točaka
- 0,5C punjenje, 0,5C pražnjenje
- SOC mjeren tijekom pražnjenja pomoću kulonovog brojanja



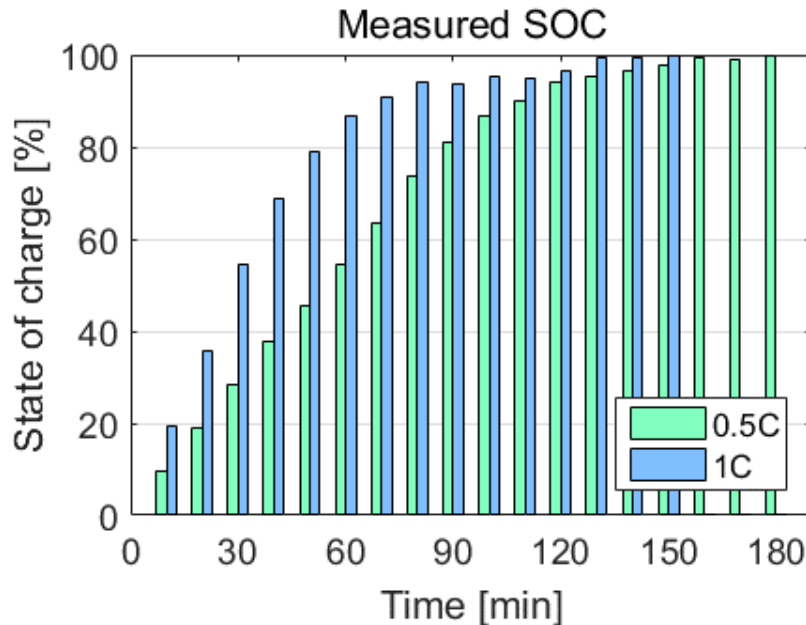
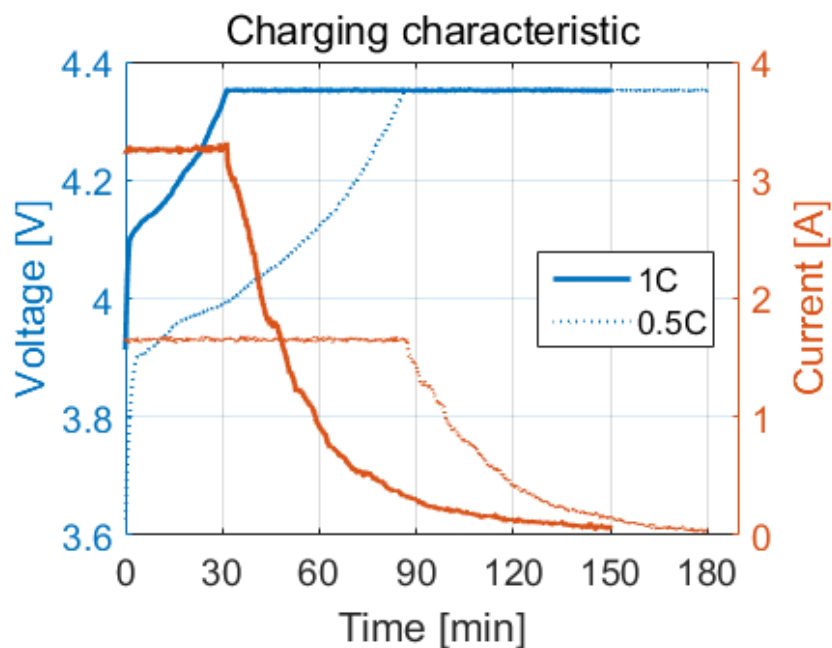
Brzo punjenje

- Uvjeti tijekom punjenja:
 - konstantna struja: 3,2 A (1C)
 - granica napona: 4,35 V
- trajanje: 150 min
- SOC karakteristika
 - 15 točaka punjenja/pražnjenja (koraci od 10 min)
 - 1C punjenje, 0,5C pražnjenje
 - kulonovo računanje



Brzo vs. standardno punjenje

- CC/CV punjenje
- Standardno punjenje: 0,5C (1,6A)
- Brzo punjenje: 1C (3,2A)
- SOC mjeren pomoću kulonovog računanja sa strujom pražnjenja od 0,5C (1,6A) – u oba slučaja



Modeliranje baterija

- Standardno u znanstvenoj literaturi (linearni model):

$$SOC_t = SOC_{t-1} + s_t^{\text{ch}} \cdot \eta^{\text{ch}} - \frac{s_t^{\text{dis}}}{\eta^{\text{dis}}}, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$SOC^{\min} \leq soc_t \leq SOC^{\max}, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$s_t^{\text{ch}} \leq S_t^{\text{ch,max}} \cdot h_t, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$s_t^{\text{dis}} \leq S_t^{\text{dis,max}} \cdot (1 - h_t), \quad \forall t \in \Omega^T$$

Modeliranje baterija

- Standardno u znanstvenoj literaturi (linearni model):

$$SOC_t = SOC_{t-1} + s_t^{ch} \eta^{ch} - \frac{s_t^{dis}}{\eta^{dis}}, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$SOC^{\min} \leq SOC_t \leq SOC^{\max}, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$s_t^{ch} \leq S_t^{ch} \cdot h_t, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$s_t^{dis} \leq S_t^{dis, \max} \cdot (1 - h_t), \quad \forall t \in \Omega^T$$

Sudjelovanje baterija u pružanju rezerve

- Primarna rezerva
- Sekundarna rezerva
- Tercijarna rezerva

Baterije pružaju primarnu rezervu

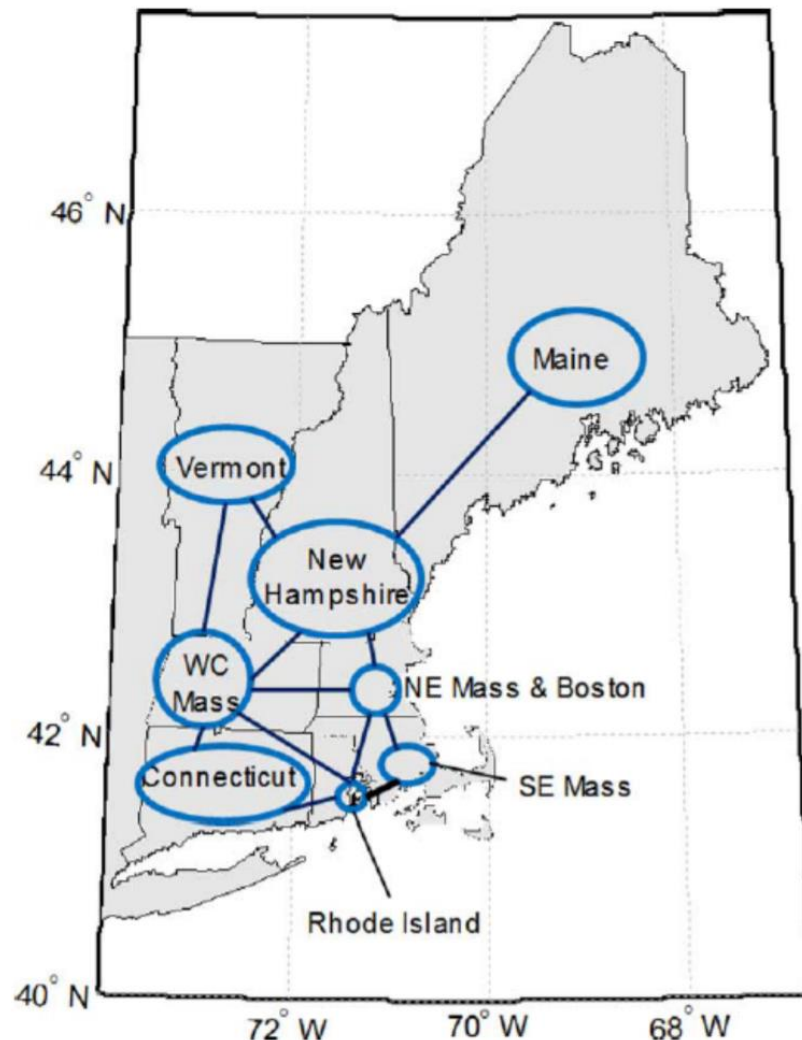
- Umjetna statičnost -> prednost
- Plesanje radne točke oko trajektorije -> prednost

- Razmatranje:
 - Ima li smisla da spremnici pružaju primarnu rezervu?
 - Treba li to uzimati u obzir u fazi planiranja investicija?

Baterije pružaju primarnu rezervu

- Case study: ISO New England

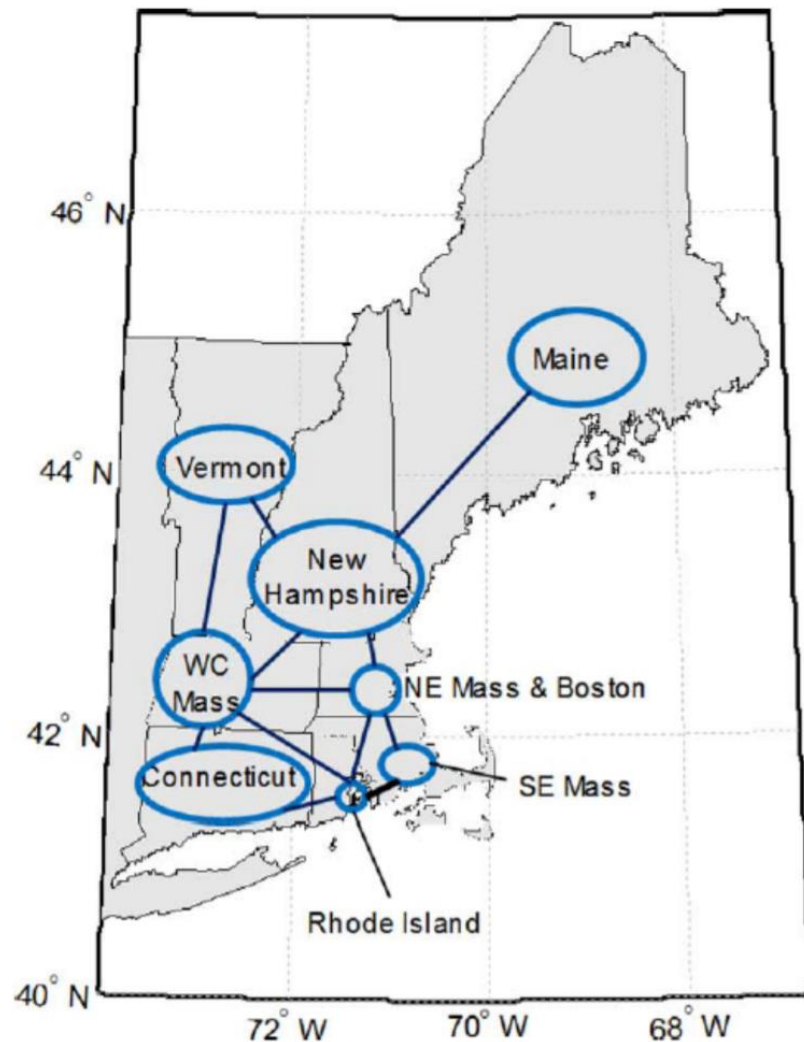
Storage cost	Metric	Storage provides PFR
High	Investment cost, M \$	1,217.5
	Expected operating cost, M \$	1,497.8
Medium	Investment cost, M \$	1,226.7
	Expected operating cost, M \$	1480.8
Low	Investment cost, M \$	1,212.0
	Expected operating cost, M \$	1,497.8



Baterije pružaju primarnu rezervu

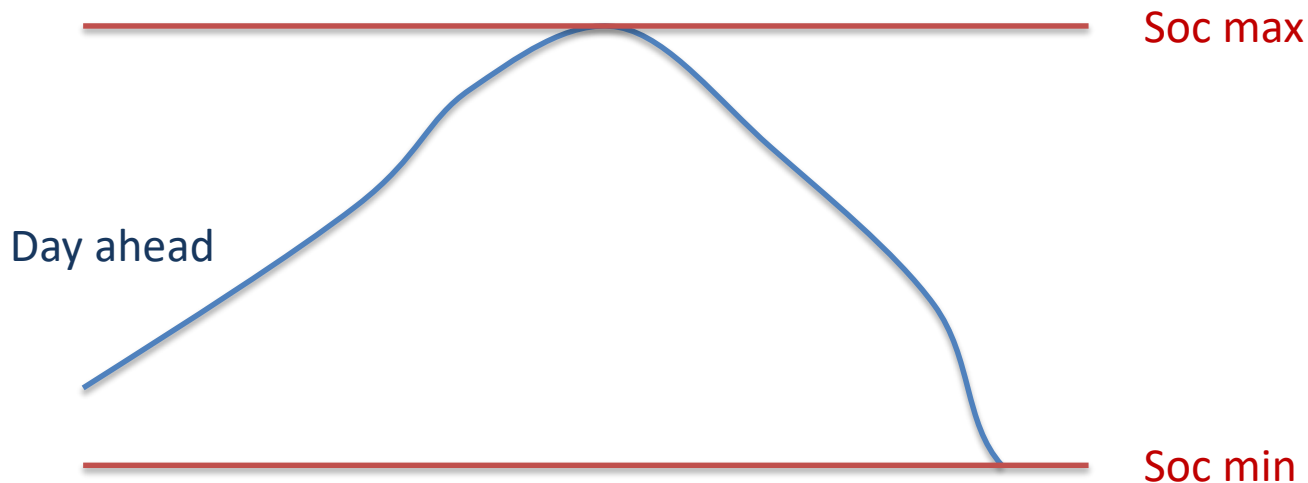
- Case study: ISO New England

Storage cost	Metric	Without PFR	With PFR
High	# of contingencies	7,722	7,459
	% of contingencies with unserved demand	5.335	4.585
	Expected unserved demand, MWh	1,531.7	1,214.5
Med	# of contingencies	8,148	7,666
	% of contingencies with unserved demand	5.167	4.696
	Expected unserved demand, MWh	1,539.9	1,252.4
Low	# of contingencies	8,482	8,476
	% of contingencies with unserved demand	5.423	5.309
	Expected unserved demand, MWh	3,549.4	1,665.7



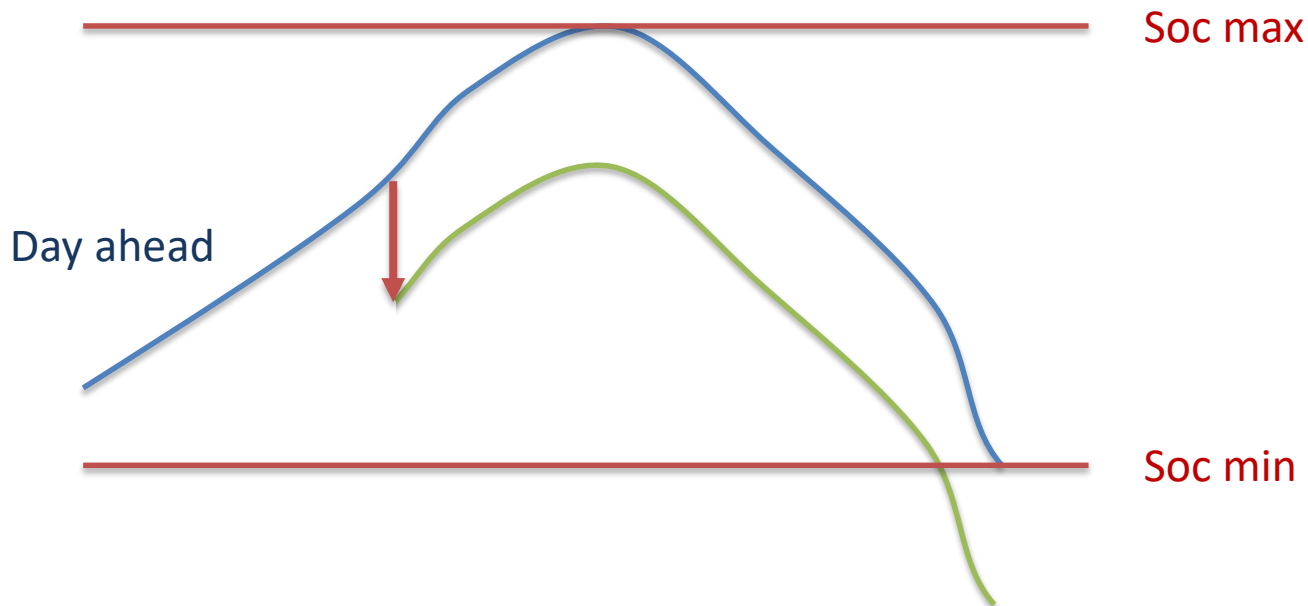
Baterije pružaju sekundarnu/tercijarnu rezervu

- Moguće pružanje kapaciteta, no što kada se taj kapacitet aktivira?



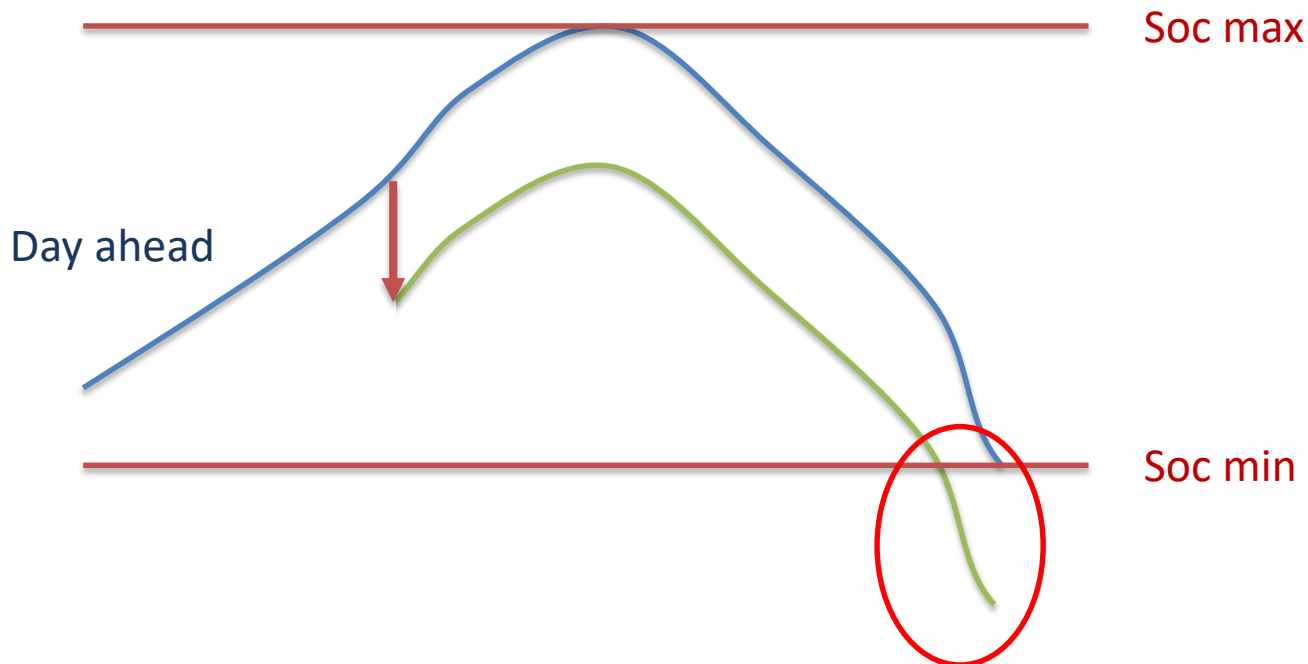
Baterije pružaju sekundarnu/tercijarnu rezervu

- Moguće pružanje kapaciteta, no što kada se taj kapacitet aktivira?



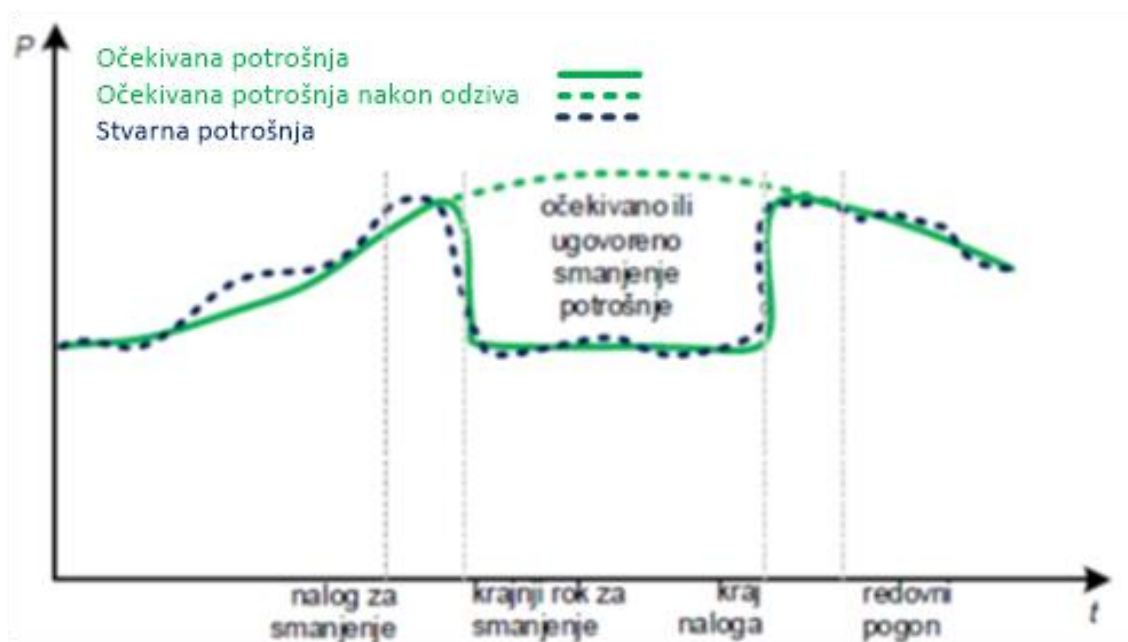
Baterije pružaju sekundarnu/tercijarnu rezervu

- Moguće pružanje kapaciteta, no što kada se taj kapacitet aktivira?



Odziv potrošnje (1)

- **Odziv potrošnje** - promjene koje je krajnji kupac spreman napraviti u svojem obrascu potrošnje električne energije kao izravan odziv na tržišne signale ili na aktiviranje usluge sustavu koju je krajnji kupac ponudio samostalno ili putem agregatora

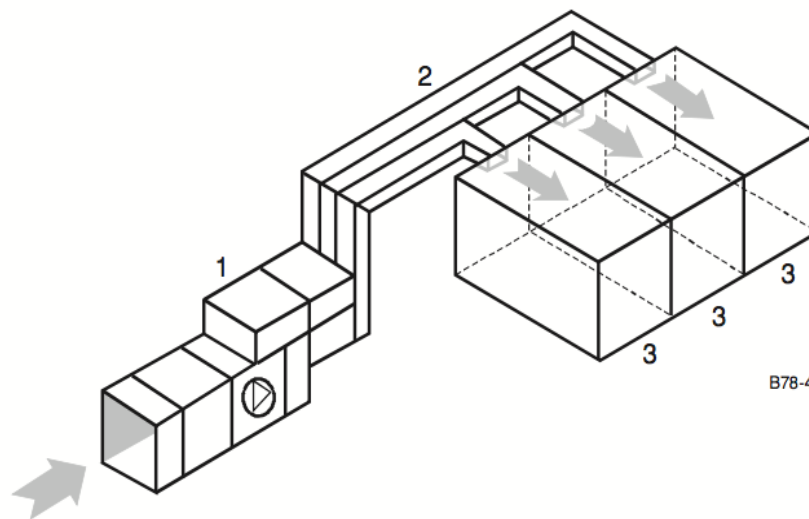


Odziv potrošnje (2)

- Pogodni sustavi i uređaji za pružanje usluga odziva potrošnje:
 - HVAC sustavi
 - Frižideri
 - Hladnjače
 - Pumpe (u vodoopskrbi i sl.)

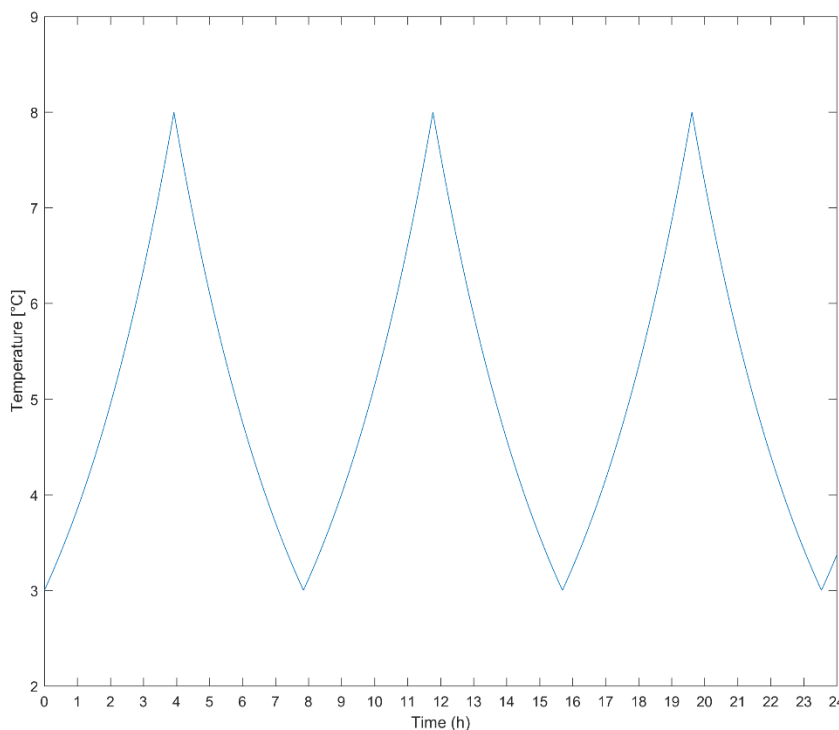
HVAC sustavi

- Sustavi grijanja, hlađenja i ventilacije zatvorenih prostorija
- Centralna priprema zraka i dorada po prostorijama ovisno o prostorije
- Korištenje prediktivnog upravljanja za upravljanje HVAC sustavima
- Dostupne informacije o meteorološkim uvjetima i prognozi mogu u kombinaciji s prediktivnim upravljanjem u značajnoj mjeri smanjiti vršno opterećenje uzrokovano od strane HVAC sustava

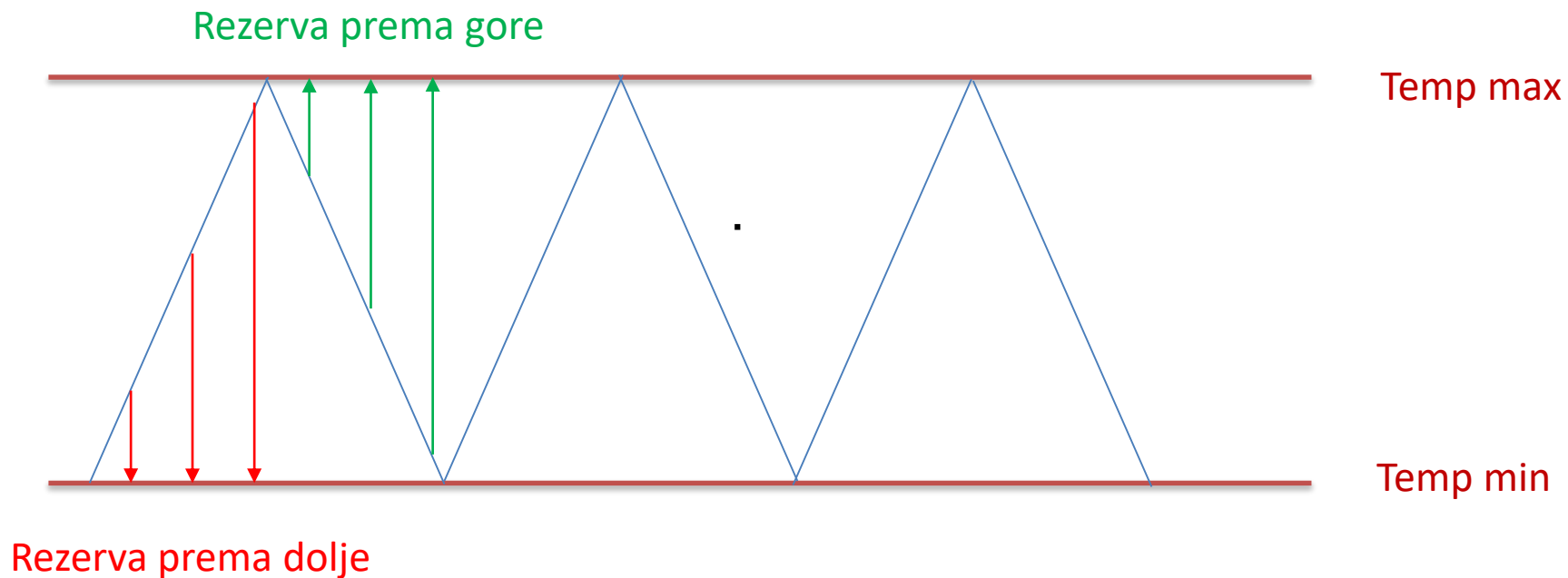


Frižideri

- Standardni frižider radi u ciklusima uključujući kompresor kada temperatura unutar rashladne komore dosegne postavljenu gornju granicu te hladi komoru sve dok temperatura ne dosegne postavljenu donju granicu
- Vrijeme jednog ciklusa je približno 3 sata što daje značajnu količinu energije za upravljanje



Frižideri



Duljina strelice odgovara mogućem trajanju pružanja usluge

Modeliranje odziva potrošnje

- Standardno u znanstvenoj literaturi (linearni model):

$$dr_t^f \leq DR_t^{f,\max} \cdot \alpha_t^f, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$drr_t^f \leq DRR_t^{f,\max} \cdot \beta_t^f, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$\alpha_t^f + \beta_t^f \leq 1, \quad \forall t \in \Omega^T$$

$$K^f \cdot \sum_{t \in \Omega^T} dr_t^f = \sum_{t \in \Omega^T} drr_t^f, \quad \forall t \in \Omega^T$$

Modeliranje odziva potrošnje

- Standardno u znanstvenoj literaturi (linearni model):
 - Ako povrat energije mora početi čim odziv potrošnje završi:

$$\beta_t \geq \alpha_t - \alpha_{t-1}, \quad \forall t \in \Omega^T$$

- Ograničeno trajanje odziva potrošnje:

$$\sum_{tt=t-1}^{t+DUR^{dr}} \alpha_{tt} \leq DUR^{dr}, \quad \forall t \in \Omega^T$$

Modeliranje odziva potrošnje

- Standardno u znanstvenoj literaturi (linearni model):
 - Ograničeno trajanje povrata energije:

$$\sum_{tt=t-1}^{t+DUR^{drr}} \alpha_{tt} \leq DUR^{drr}, \quad \forall t \in \Omega^T$$

- U slučaju da se povrat energije obavlja isključivo nakon odziva potrošnje:

$$\sum_{t \in \Omega^T} dr_t^f \geq K^f \cdot \sum_{t \in \Omega^T} drr_t^f, \quad \forall t \in \Omega^T$$

Spremnici energije u svijetu

- Pohranjena / isporučena električna energija:
 - SAD 2.5%
 - Europa 10%
 - Japan 15%

Inicijative

- California
 - CPUC zahtijeva 1,325 MW spremnika u pogonu do 2020 (PG&E 580 MW, SCE 580 MW, SDG&E 165 MW)
 - Spremnici će biti priključeni na tri razine:
 - Prijenosna mreža
 - Distribucijska mreža
 - Krajnji korisnici

		2014	2016	2018	2020	Ukupno
SCE i PG&E	Prijenos	50	65	85	110	310
	Distribucija	30	40	50	65	185
	Potrošači	10	15	25	35	85
	Ukupno	80	120	160	210	580
SDG&E	Prijenos	10	15	22	33	80
	Distribucija	7	10	15	23	55
	Potrošači	3	5	8	14	30
	Ukupno	20	30	45	70	165
	ZBROJ	200	270	365	490	1,325

Spremnici energije u svijetu

- 27 MW tijekom 15 min NiCd – Fairbanks, AL (2003)
 - 20 MW tijekom 15 min zamašnjak – Stephentown, NY (2011)
 - 32 MW tijekom 15 min Li-Ion – Laurel Mountain, WV (2011)
 - 36 MW tijekom 40 min Lead Acid – Notrees, TX (2012)
 - 8 MW tijekom 4 h Li-Ion – Tehachapi, CA (2014)
 - 25 MW tijekom 3 h Flow bat. – Modesto, CA (2014)
 - 5 MW tijekom 1 h Li-Ion – Schwering, Njemačka (2014)
- Popis projekata: <http://www.energystorageexchange.org/projects>

Problem vlasništva

Power Intensive

- Mission: increase safety of grid
- Total Power: **≈ 40 MW**
- Solutions: Li-Ion, Zebra, Flow, Supercaps
- Number of sites: **2**
- Investment Size: 93 €mln;

PHASE I: 16 MW Storage Lab

Site 1 Codrongianos

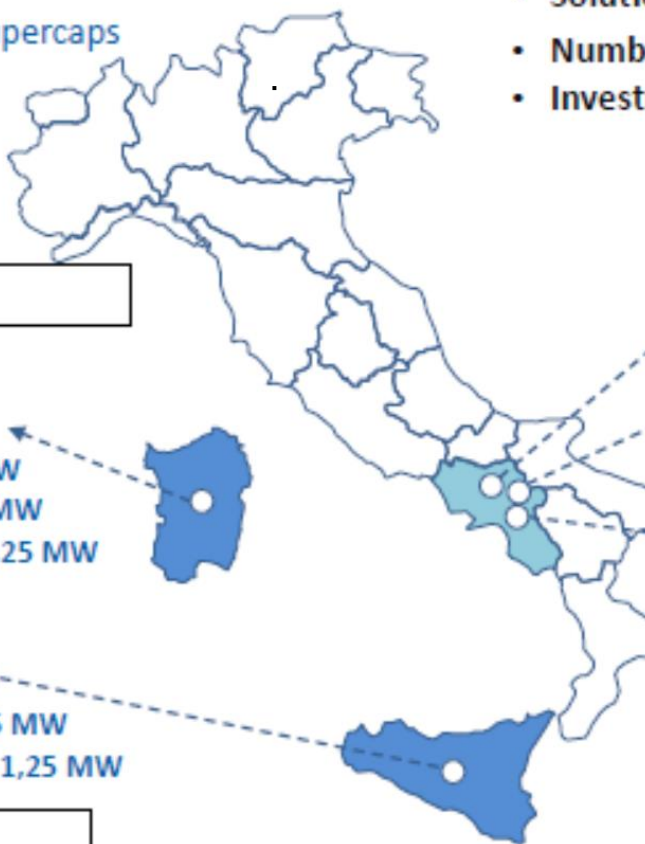
- Total Power: **≈ 9,15 MW**
- Status: operational **≈ 5,4 MW**
in commissioning **≈ 2,1 MW**
under construction **≈ 0,4 MW**
procurement initiated **≈ 1,25 MW**

Site 2 Ciminna

- Total Power: **≈ 6,8 MW**
- Status: operational **≈ 5,1 MW**
under construction **≈ 0,45 MW**
tender to be submitted **≈ 1,25 MW**

PHASE II: 24 MW

Casuzze and Codrongianos: *to be initiated*



Energy Intensive

- Mission : reduce grid congestions
- Total Power: **≈ 35 MW**
- Solution: NaS *Sodium Sulfur*
- Number of sites: **3**
- Investment Size: 160 €mln;

Site 1: Ginestra

- Total Capacity: **≈ 12 MW**
- Status: operational

Site 2 Flumeri

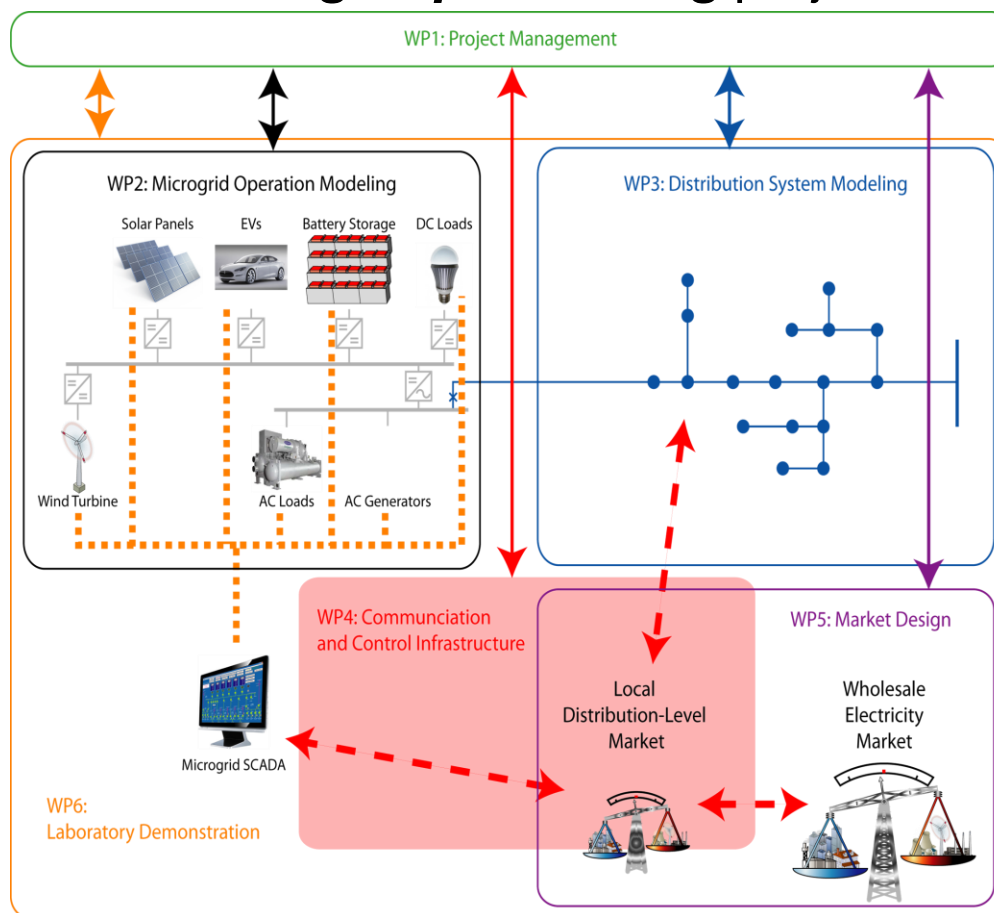
- Total Capacity: **≈ 12 MW**
- Status: operational

Site 3 Scampitella

- Total Capacity: **≈ 10.8 MW**
- Status: operational

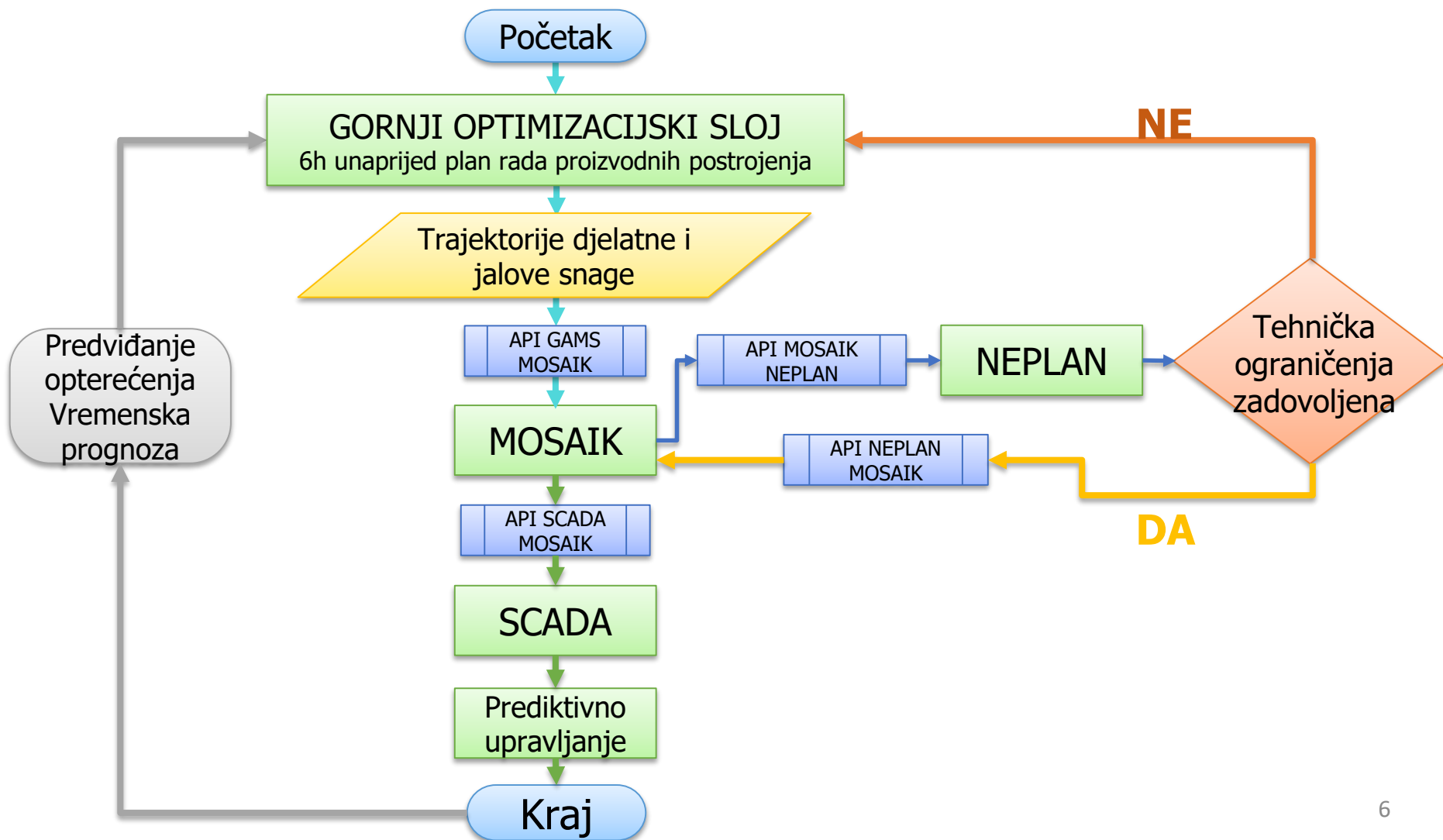
Mikromreže temeljene na obnovljivim izvorima kao dodatni izvor fleksibilnosti u EES-u (1)

Microgrid positioning projekt



Struktura projekta

Mikromreže temeljene na obnovljivim izvorima kao dodatni izvor fleksibilnosti u EES-u (2)



Zahvala projektu

Istraživanja integracije obnovljivih izvora energije provode se u sklopu projekta **SIREN** koji je financiran od strane HOPS-a (Hrvatski operator prijenosnog sustava) i HRZZ-a (Hrvatska zaklada za znanost).



Istraživanja koncepta fleksibilnosti i optimalnog pogona distribucijskih mreža provode se u sklopu projekta **uGRIP** koji je financiran od strane Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost

