

---

# NAPREDNI DOM I AKTIVNI KUPAC KAO SASTAVNICE NAPREDNIH MREŽA

## Tema 3

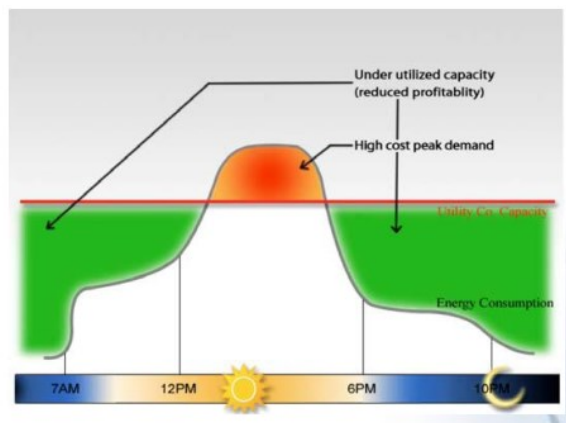
### Pohrana viška raspoložive energije i njeno naknadno korištenje

Hrvoje Keko, dipl.ing.el.  
 Energetski institut Hrvoje Požar

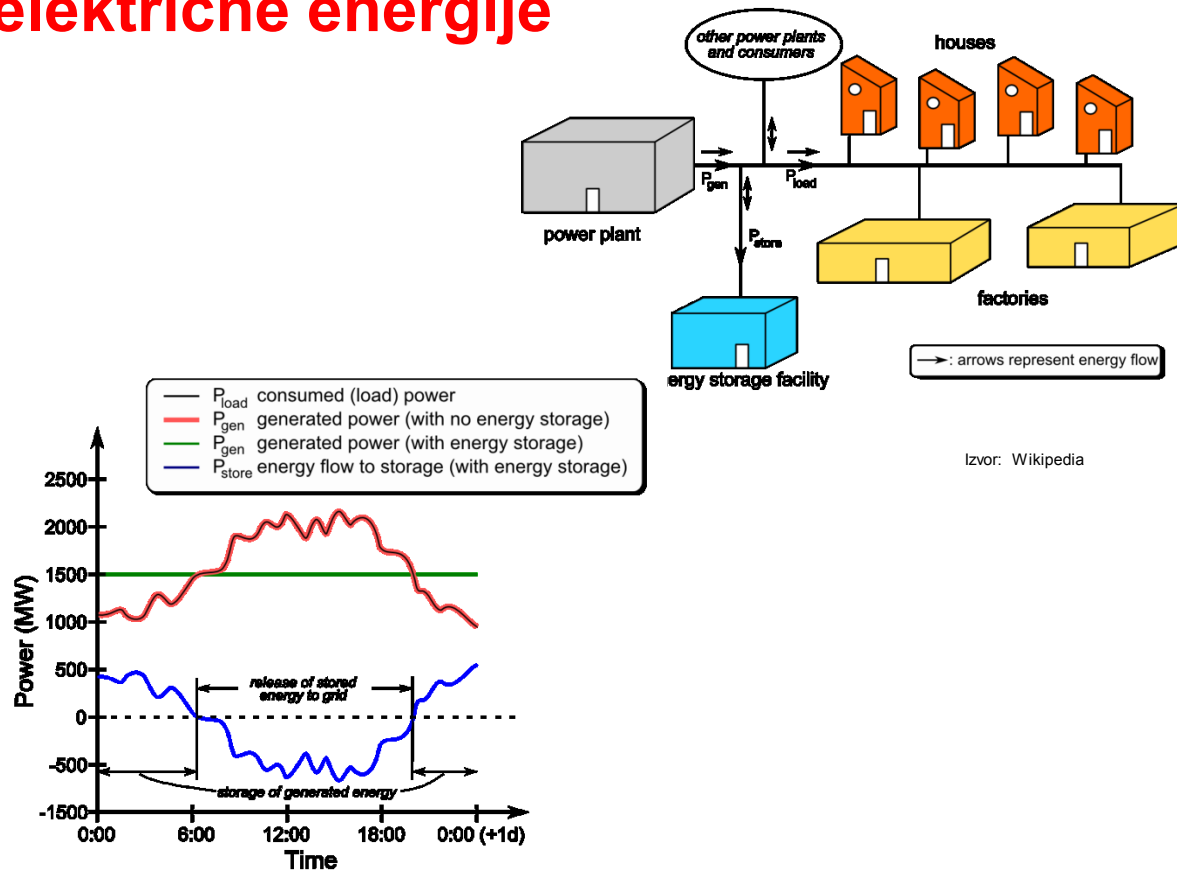


# Osnovna ideja spremnika električne energije:

## vremensko razdvajanje proizvodnje i potrošnje električne energije



Izvor: Wikipedia



Izvor: Wikipedia

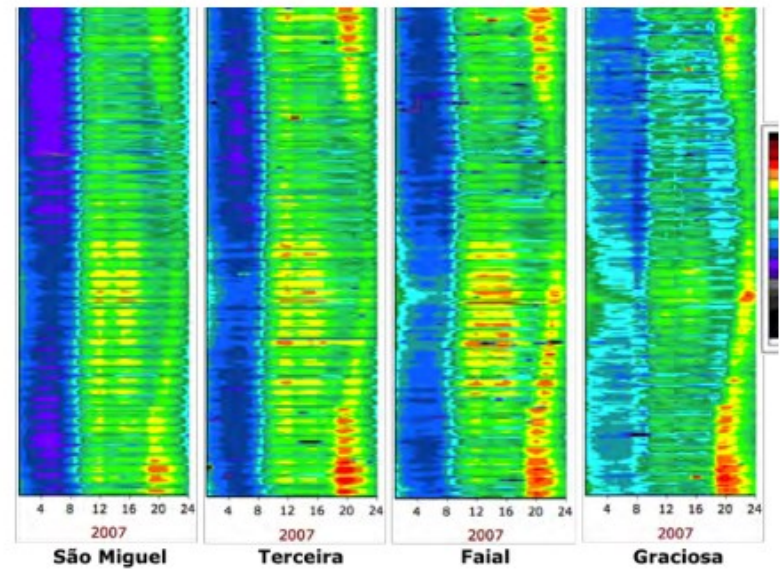
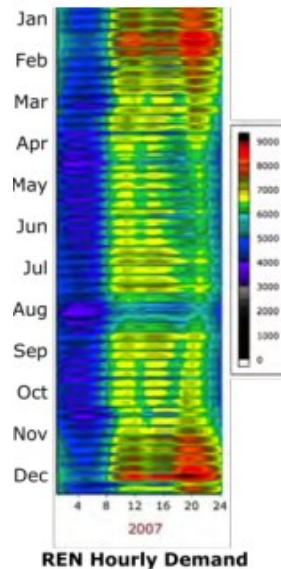
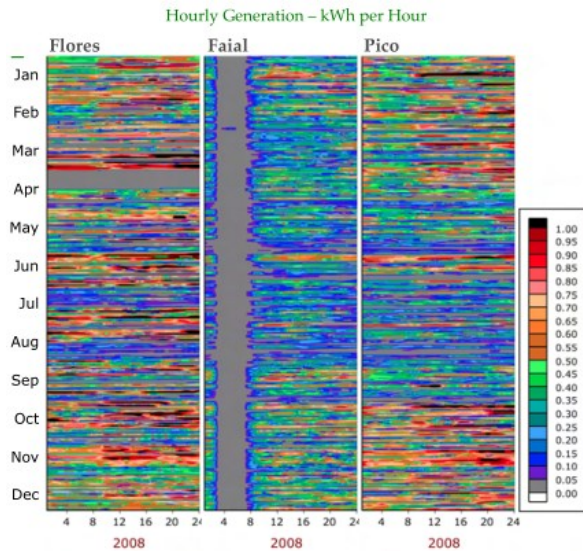
---

# Pregled primjene spremnika energije u elektroenergetici

- do 1980-ih godina:
  - praktično isključivo reverzibilne hidroelektrane
  - dvije osnovne svrhe: zadržavanje velikih TE (na ugljen) u optimalnom radnom režimu i smanjenje potrebe za skupim plinskim vršnim TE
- tokom osamdesetih pojavljuju se interesi i za drugim tehnologijama
  - baterijskim i ostalim (komprimirani zrak)
  - ne mogu veličinom i snagom parirati reverzibilnim hidroelektranama
- devedesete godine donose prve opsežnije studije mogućeg utjecaja
  - porast udjela obnovljivih izvora i povezanih neizvjesnosti pojačava interes
- početak 21. stoljeća donosi:
  - širenje obnovljivih izvora i jasan pogled u smjeru elektromobilnosti
  - razvoj komercijalne primjene u više redova veličina (deseci kW do desetaka MW)

# Izazov:

**proizvodnja iz obnovljivih izvora energije relativno slabo se vremenski poklapa s potrošnjom**

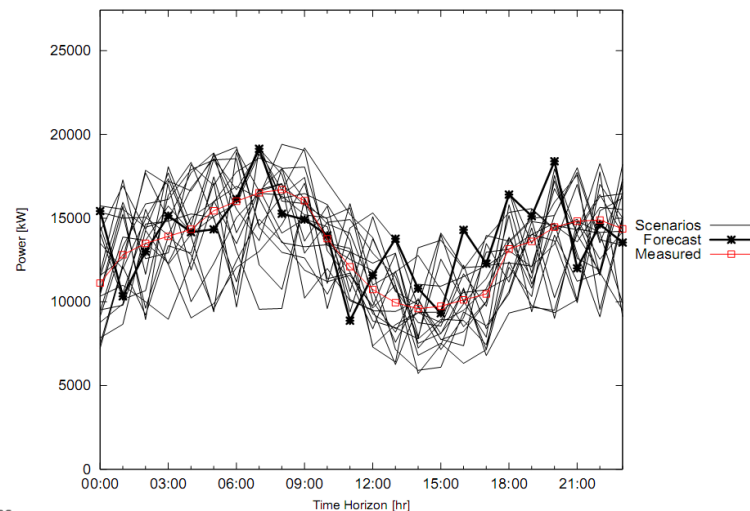
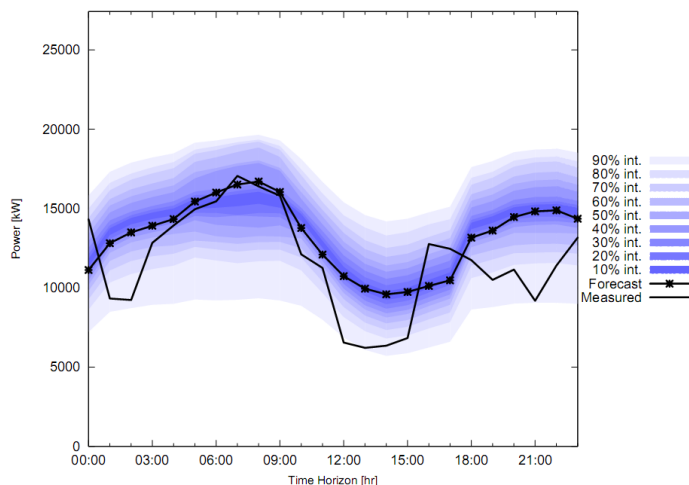


Primjer: Azori, Portugal; karakteristika proizvodnje iz vjetroelektrana i potrošnje za godinu dana

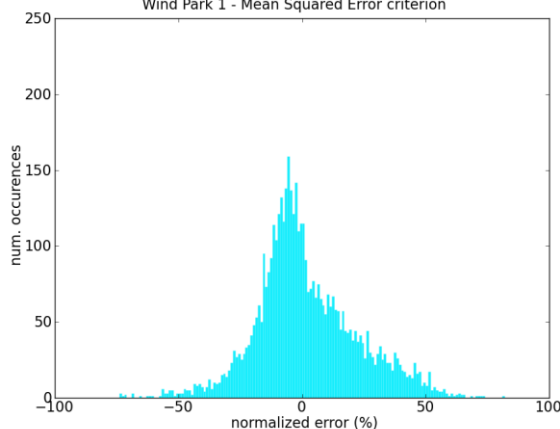
MIT Portugal

Izvor: predavanja MIT Portugal Sustainable Energy Systems, prof. Stephen Connors; projekt „Green Islands Açores”

# Izazov: pogreške u prognoziranju proizvodnje iz obnovljivih izvora energije



Histogram of normalized error occurrences  
Wind Park 1 - Mean Squared Error criterion



---

## Koje su (moguće) koristi od pohrane el. energije?

- vremenski odmak potrošnje i proizvodnje (arbitraža)
  - može omogućiti ekonomičniju eksploataciju primarnih izvora i povećanje udjela obnovljivih izvora

## Dodatne usluge

- regulacija
- primarna i sekundarna rezerva
- održavanje naponskih prilika u mreži i izbjegavanje kolapsa
- crni start (*black start*)

## Infrastrukturne

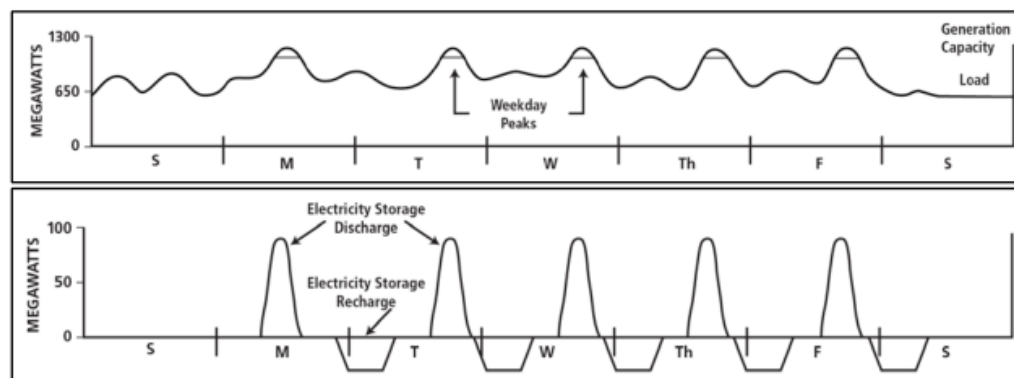
- odgoda investicija u pojačanje prijenosnih i distribucijskih vodova

## Za krajnjeg kupca

- kvaliteta električne energije i njena raspoloživost
- upravljanje potrošnjom i ekonomičnije zadovoljavanje potreba uz isti komfor

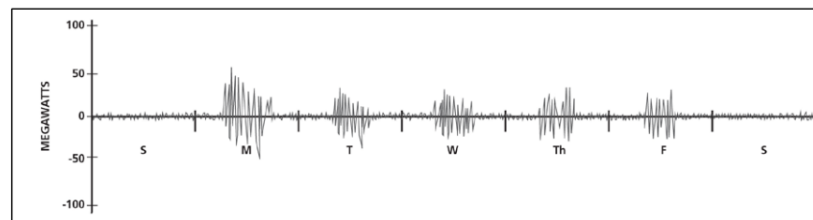
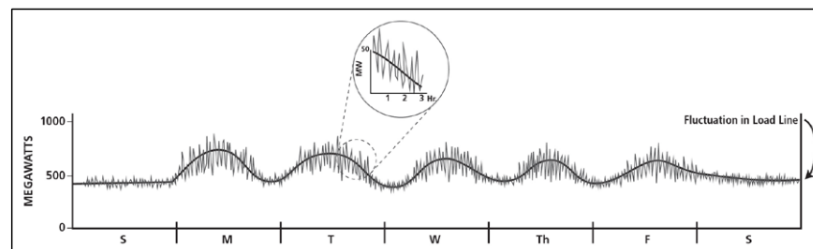
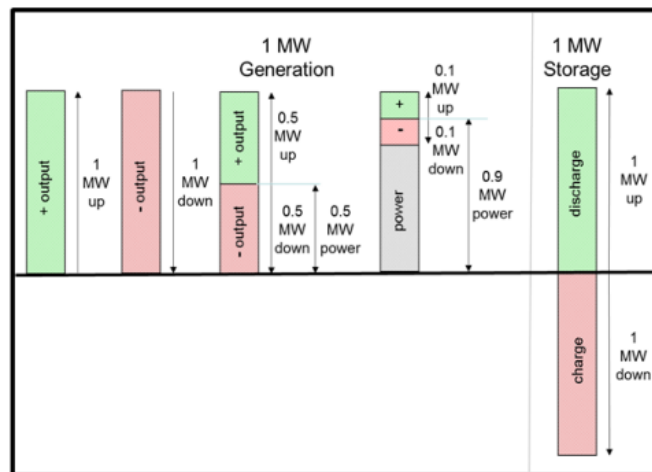
## Vremenski pomak proizvodnje i potrošnje:

- kupnja električne energije i preuzimanje iz sustava
  - a) kad je cijena u sustavu niska ili
  - b) kad postoje viškovi iz obnovljivih izvora
- kasnija predaja spremljene energije sustavu
- ciljane snage reda veličine MW do stotina MW
  - više razine snage obično vezane uz eksploataciju energije vjetra
- vrijeme pražnjenja **u satima**
- **više stotina** ciklusa godišnje
- pokrivanje vršne proizvodnje i odgoda/zamjena izgradnje vršnih proizvodnih jedinica



## Dodatne usluge:

- spremnici su posebno dobrih karakteristika za **frekvencijsku regulaciju** (održavanje frekvencije)
  - dobre dinamičke karakteristike: vrlo visok *ramp rate* – mogu brzo promijeniti snagu
    - 2 do 3 puta brže od konvencionalnih izvora
  - ciljana razina snage ovisi o veličini sustava
    - procjena reda veličine mjeri se u desecima MW
    - vrijeme pražnjenja **u minutama**
    - **više tisuća** ciklusa u jednoj godini eksploatacije

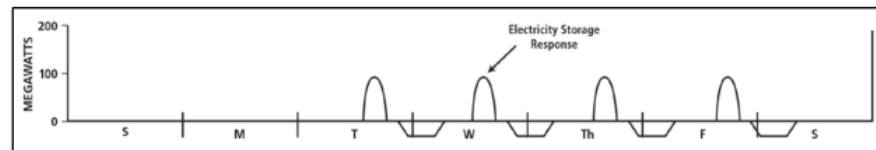
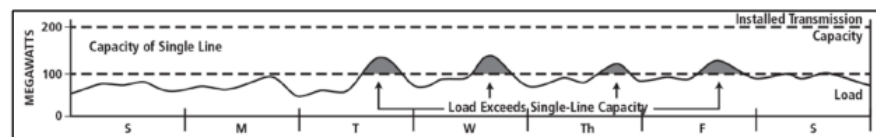
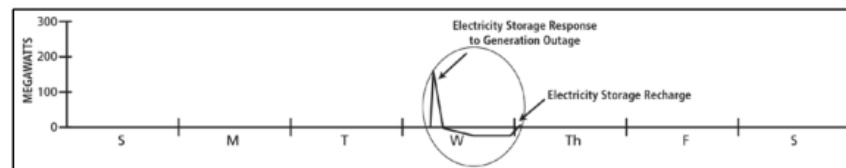
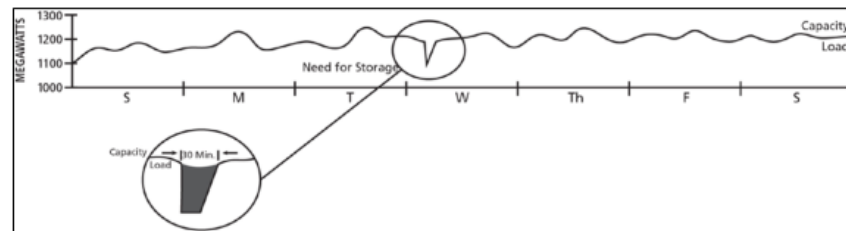


Više:  
Energy Storage for Frequency Regulation on the Electric Grid  
Olivia Leitermann, doktorska disertacija, MIT 2013, <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/75639>



## Dodatne usluge:

- pružanje usluge rezervi
  - deseci do stotina MW za prosječnu veličinu EES
    - vrijeme angažmana u minutama
    - nekoliko desetaka ciklusa po godini eksploatacije
- doprinos kvaliteti električne energije – održavanje razine niskog napona u granicama normale,
- *black start* – brže podizanje sustava
- odgoda investicija u mrežnu infrastrukturu (smanjenje zagušenja)...
- ostalo: prigušenje subsinkronih oscilacija...



---

# Interes regulatora i poticaji

- **Kalifornija** zahtijeva **1.3 GW** na mreži **do 2020.** godine

- zahtjev prema distribucijskim poduzećima
- izvor: **CPUC** – *California Public Utilities Commission*
- **GW** (ne GWh); **AB2514** – „Energy Storage Systems”
  - praktično: državna pomoć privatnom sektoru spremnika energije, da bi prebrodili financijski *death valley* – manjak financiranja od *startupa* do profitabilnosti



<http://energystoragejournal.com/californias-ab-2514-storage-policy-in-action/>

<http://www.greentechmedia.com/articles/read/california-sets-1.3gw-energy-storage-target-by-2020>

<http://docs.cpuc.ca.gov/PublishedDocs/Efile/G000/M065/K706/65706057.PDF>

<http://breakingenergy.com/2012/05/29/california-energy-storage-startup-community-gets-state-bridge-ac/>

- **Njemačka:**

- potpora spremnicima energije na kućnoj razini od 1. svibnja 2013.
- 600 € / kW, do 30% ukupnog troška za novi PV sustav
- 1100 sustava već ima odobrenje, 4800 u proceduri
- izvor: BSW: Bundesverband Solarwirtschaft
- kretanje *feed-in* tarifa i pad cijena fotonaponskih sustava čine razumnim potrošnju energije na mjestu proizvodnje

BSW: <http://www.solarwirtschaft.de>

SmartGridNews <http://goo.gl/ZfHF5e> ; <http://goo.gl/EV3bRO>

- trenutno najveći projekt u Europi u UK
  - kooperacija S&C Electric, Samsung SDI i Younicos
  - 6 MW i 10 MWh, Li-Ion baterije
  - infrastrukturni motiv:  
smanjenje potrebu za izgradnjom vodova i zamjenom trafoa
  - cijena projekta – oko **22 milijuna €**



Izvor: Younicos, Njemačka



Izvor: IEEE Spectrum

<http://spectrum.ieee.org/energywise/energy/the-smarter-grid/uk-launches-europes-largest-energy-storage-trial>  
<http://cleantechnica.com/2013/11/20/game-changing-battery-storage-company-germany-yunicos/>

# Klasični način pohrane energije u velikim razmjerima:

- **Reverzibilne hidroelektrane**

preko **99%** ukupnog kapaciteta spremnika na mreži u svijetu, cca 127000 MW instalirane snage spremaju oko 2% proizvedene električne energije

Izvori: The Economist <http://www.economist.com/node/21548495?frsc=dgja>

EPRI – Electric Power Research Institute i SANDIA National Laboratory <http://www.sandia.gov/ess/publications/SAND2013-5131.pdf>

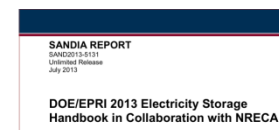
## primjer u Hrvatskoj: **RHE Velebit**

na rijeci Zrmanji, 10km od Obrovca

276 MW u turbinskom radu i 240 MW u crpnom radu

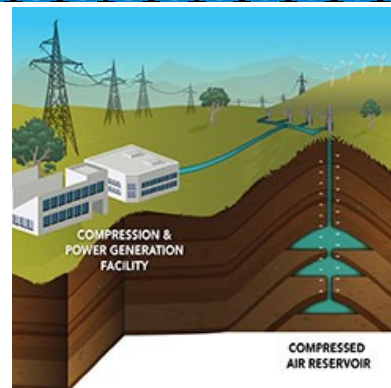


Izvori: HEP, Zadarski list, Geodetski Zavod Split



## Spremnici s komprimiranim fluidom

- komprimiranje zraka i spremanje u spremnik
  - geološke formacije (podzemne špilje, napušteni rudnici) ili posebno dizajnirani umjetni cijevni sustavi
  - SustainX - sustav od 1.6 MW snage s cijevnim spremnicima instaliran u New Hampshireu, SAD
  - rekuperacija otpadne topline iz procesa kompresije
- zrak expandira kroz ekspanzijsku turbinu i tako proizvodi električnu energiju
- zanimljivost: koncept **Hybrid Air** PSA Peugeot Citroën: spremnik komprimiranog zraka instaliran je u osobni automobil u „tunel” između prednjih sjedala i rekuperira energiju spremljenu kod kočenja

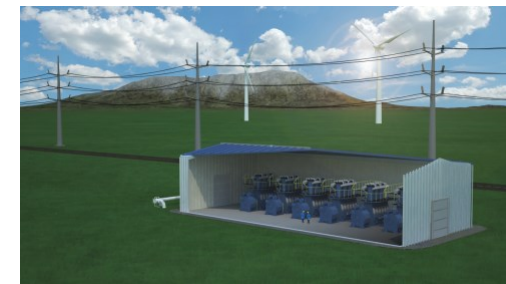


Izvor: PNNL, Pacific Northwest National Laboratory



Izvor: IEEE Spectrum

<http://spectrum.ieee.org/energywise/energy/the-smarter-grid/compressed-air-energy-storage-makes-a-comeback>



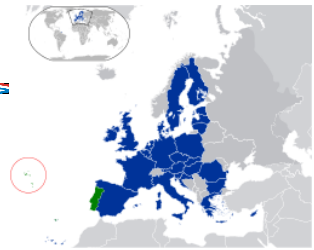
Izvor: Phys.org i SustainX

<http://phys.org/news/2013-09-sustainx-mw-isotherm-compressed-air.html>

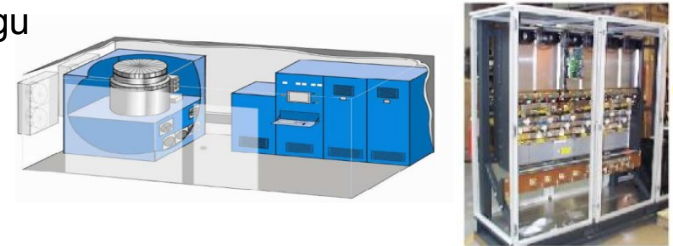


Izvor: PSA Peugeot Citroën

# Zamašnjaci



- engl. *flywheel*, temelje se na spremanju energije u kinetičku energiju vrtnje zamašnjaka
  - kritični problem – *trenje*: u vremenu od nekoliko h mogu izgubiti i više od *polu* spremljene energije
- u EES primjenjivi za frekvencijsku regulaciju
  - prikladniji su za iznimno naglu isporuku velike snage i kratkog trajanja
    - koriste se i u Formuli 1 – *kinetic energy recovery system*



Izvori: EDA – Electricidade dos Açores, [www.eda.pt](http://www.eda.pt)  
<http://www.eurelectric.org/media/50444/andre.pdf>  
[http://www.ifema.es/ferias/genera/2013/jomadas/ree28/francisco\\_b.pdf](http://www.ifema.es/ferias/genera/2013/jomadas/ree28/francisco_b.pdf)

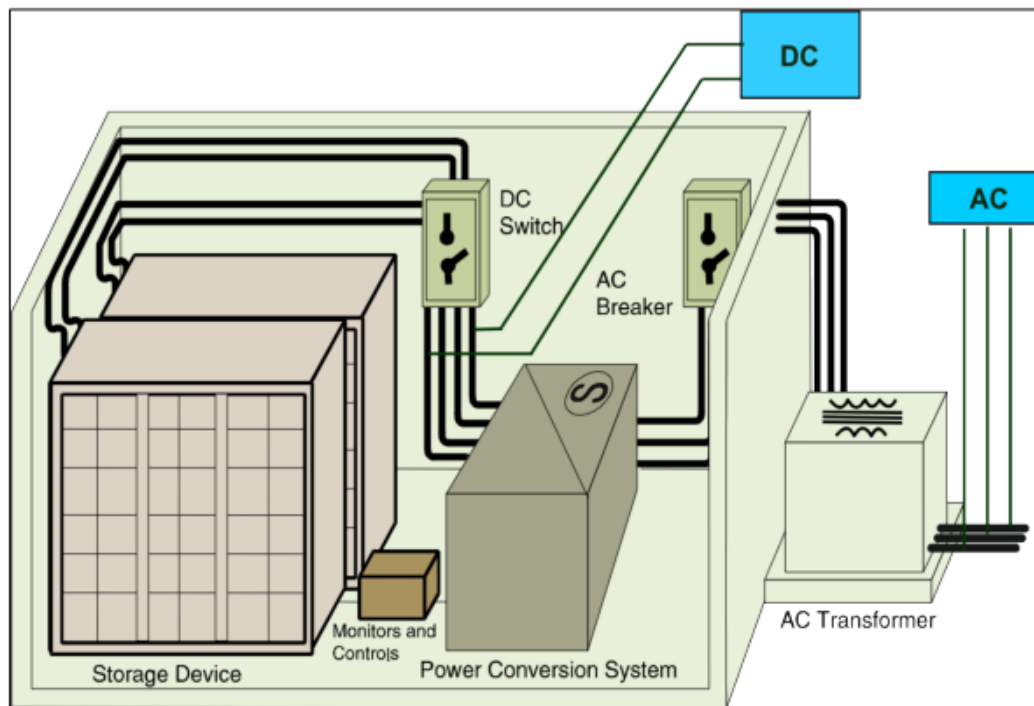
- Portugal: atlantski otoci Azori: otok Flores
  - Electricidade dos Açores, izvori: geotermalni, vjetar, diesel
  - kompenzacija oscilacije proizvodnje iz vjetroelektrana
  - niska brzina vrtnje (do 3300/min) + energetska elektronika
  - 500 kW do maksimalno 30 sekundi (16.5 MJ);  
4 ms od 0 do +/- 500 kW
- New York, SAD:
  - Beacon Power Corporation, od 2011. u pogonu
  - 20 MW, 5 MWh kroz 15 minuta
  - moduli od 1 MW i 250 kWh



Izvor: Beacon Power Corporation  
[http://www.beaconpower.com/files/Beacon\\_Power\\_presentation\\_ESA%206\\_7\\_11\\_FINAL.pdf](http://www.beaconpower.com/files/Beacon_Power_presentation_ESA%206_7_11_FINAL.pdf)

# Baterijski spremnici električne energije

shematski prikaz



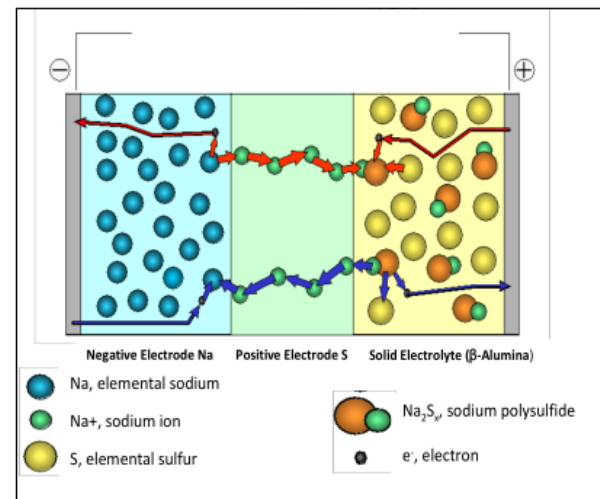
Izvor: Sandia National Laboratories

Oslanjaju se na uređaje energetske elektronike - invertere da bi iz izmjeničnu struju pretvorili u istosmjernu kod pohrane, odnosno obratno kod korištenja energije iz spremnika.

## Tehnologije izrade **stacionarnih** baterija za mrežne razine primjene

### - NaS

- prikladne za mrežnu razinu
- oko 160MW instalirano (Tokio, Japan)
- 300-tinjak MW na svjetskoj razini, oko 1800 MWh
- dug period pražnjenja
- 300 do 350 °C radne temperature



### - NaNiCl<sub>2</sub>

- 20 kWh po ćeliji
- kod punjenja, NaCl i Ni prelaze u NiCl<sub>2</sub> i Na, kod pražnjenja obratno

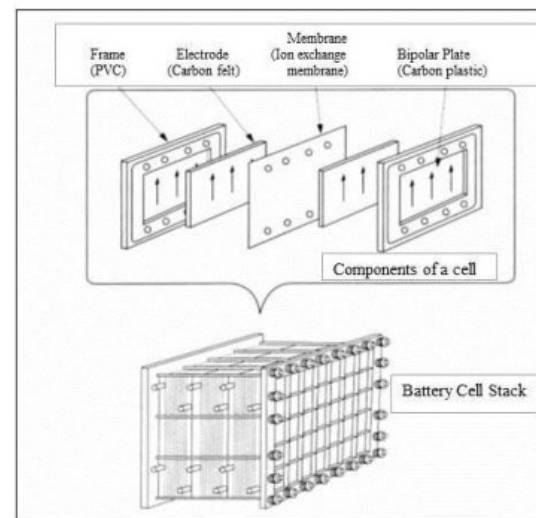




## Tehnologije izrade **stacionarnih** baterija za mrežne razine primjene (2)

### - Vanadij-redox

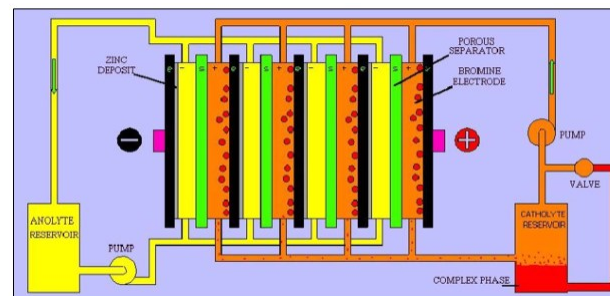
- primjer tzv. *flow* baterija: jedan ili oba aktivna materijala su u elektrolitu
- ioni vanadija su u kiselini tijekom cijelog procesa
- ioni vanadija primaju i otpuštaju elektrone tijekom procesa punjenja odnosno pražnjenja



### - FeCr redox

- također *flow* baterija, još uvijek u razvoju, obećava zbog niske cijene sirovina

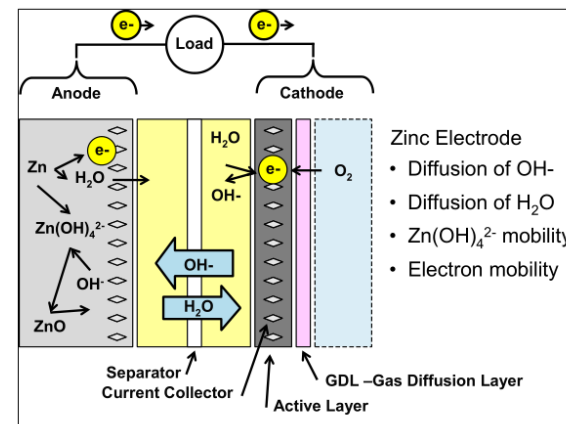
### - $ZnBr_2$ – cink-brom



## Tehnologije izrade **stacionarnih** baterija za mrežne razine primjene (3)

### - Cink-zrak

- rana faza razvoja
- koristi se elektropozitivni metal u elektrokemijskoj reakciji s kisikom iz zraka
- moguća visoka gustoća energije
- relativno loša iskoristivost (povrat energije)



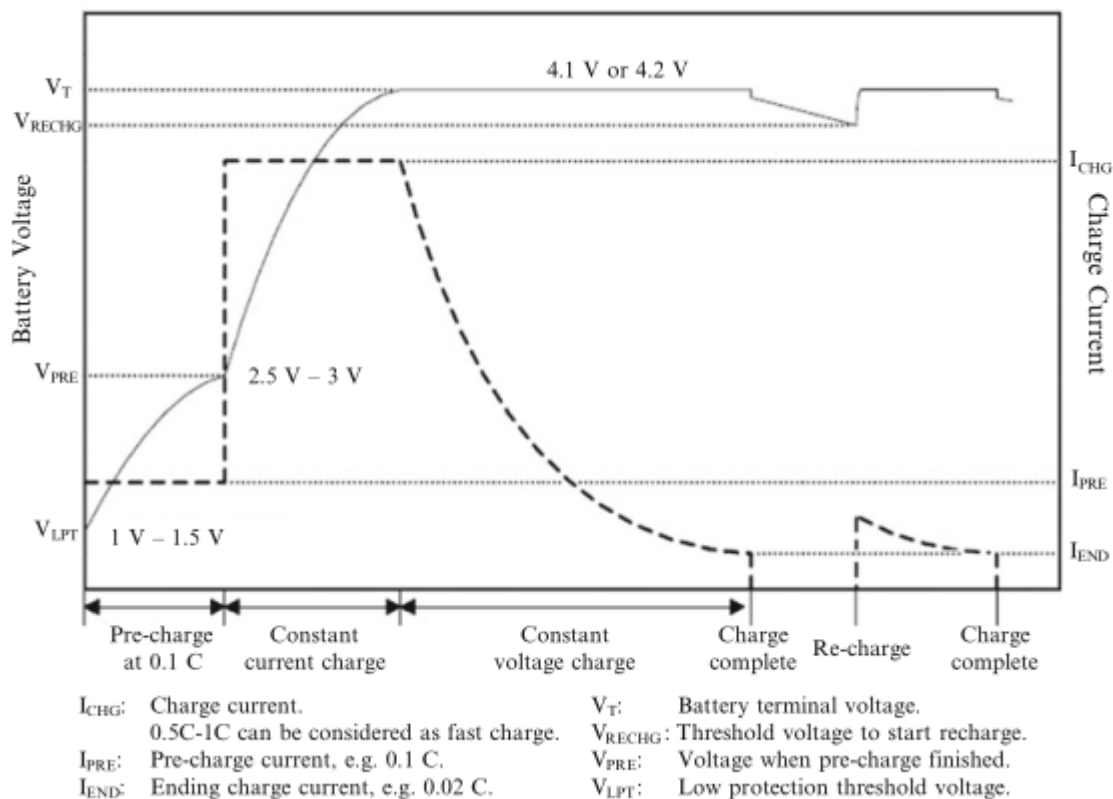
### - klasične **olovne baterije**

- novije tehnologije koriste posebne geometrije elektroda i korozivskih barijera kao i napredne elektrolite

### - Li-Ion

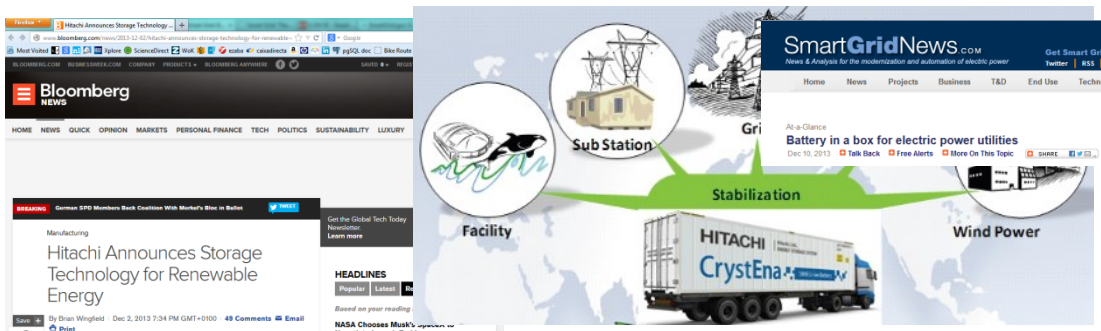
- najbrže rastuća platforma i baterijska tehnologija
- smatra se zreom tehnologijom za komercijalnu uporabu

# Karakteristika punjenja Li-ion baterije u ovisnosti o stanju napunjenosti (*state of charge*)



Izvor: R. Garcia-Valle and J.A. Peças Lopes (eds.), **Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks**, Springer, 2013.

# Ilustracija današnjeg tržišta baterijskih sustava pohrane na razini distribucijskih poduzeća – red veličine MW



<http://www.bloomberg.com/news/2013-12-02/hitachi-announces-storage-technology-for-renewable-energy.html>

**Hitachi CrystEna: nedavno predstavljen „plug and play” kontejner**

1MW snage, do 1MWh; Li-ion

američka kompanija **MegaBess** nudi više redova veličine gotovih spremnika u kontejnerima

Li-Ion baterijski spremnici  
1MW snage, 250 kWh ili 1 MWh



Izvor <http://megabess.us/>

## Kućni spremnici energije

– sustavi za potporu solarnim panelima u „otočnom” radu bez mreže

- zadano: lokacija, tražena autonomija, potrošnja, vršna snaga
- dimenzioniraju se:
  - baterije (akumulatori),
  - regulator punjenja,
  - inverter,
  - kabeli (!),
  - zaštita

– u novije vrijeme: *plug and play* integrirana rješenja

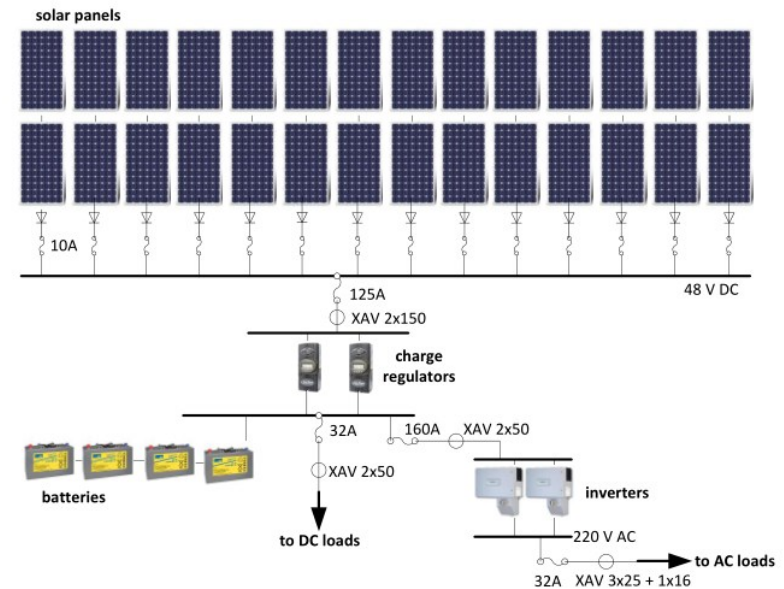


Figure 3 – PV system electrical scheme

Izvor: MIT Portugal PhD Course: Electrical Systems with Renewables

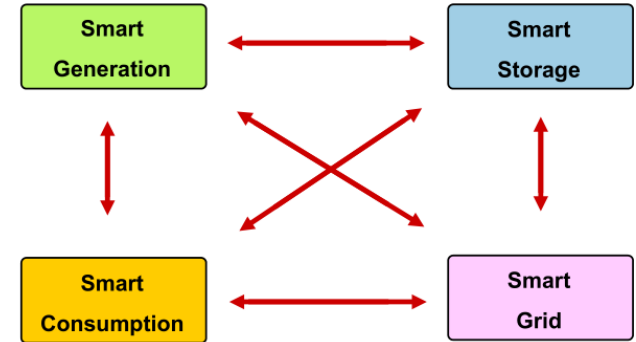
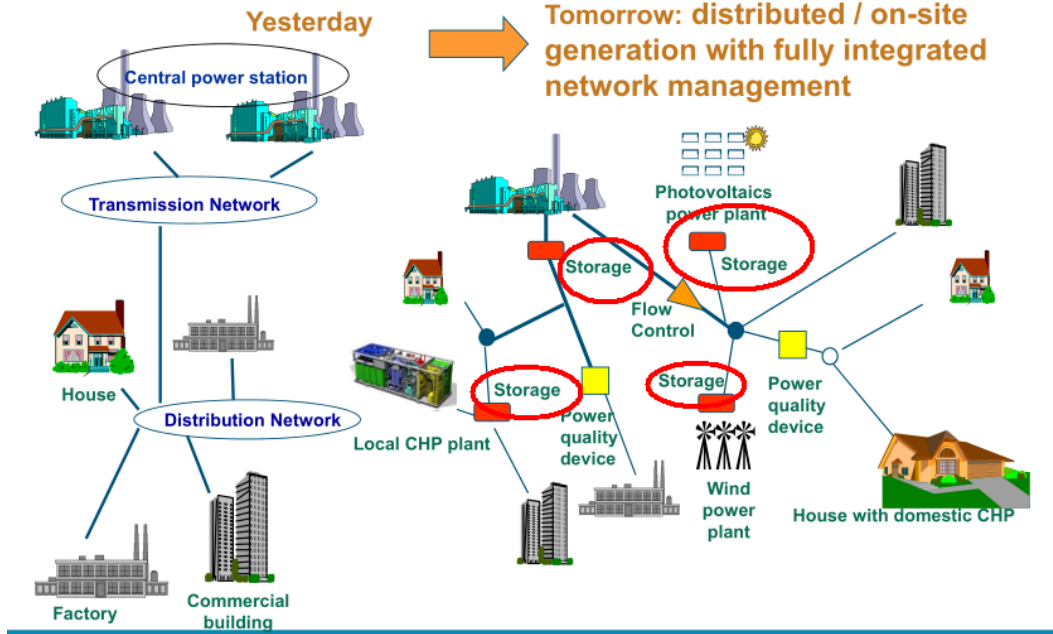


Izvor: BusinessWeek  
<http://www.businessweek.com/articles/2013-12-06/teslas-solar-power-storage-unit>

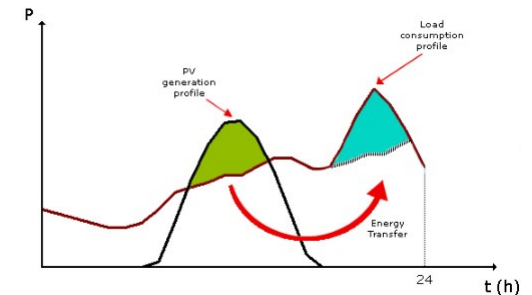


Izvor: SolarCity, partner Tesla Motors

# • Spremnici energije u konceptu napredne mreže



Izvor: INESC TEC, Porto, Portugal



- u konceptu decentralizirane i inteligentne *napredne mreže* (*smart grid*) pohrana energije ima značajnu ulogu – posebno u **međudjelovanju s ostalim činiteljima**

# Primjeri kapaciteta baterijskih spremnika potpuno električnih vozila na tržištu u 2013.

- **Citroën C-Zero – 16 kWh**

joint venture PSA i Mitsubishi, isti auto je i Peugeot Ion i Mitsubishi i-MiEV  
oko 25 tisuća prodanih primjeraka od 2010-2013



Izvor: EIHP

- **Nissan Leaf – 24 kWh**

najprodavaniji FEV, preko 90 tisuća prodanih;  
samo u Norveškoj ih je preko 6000



Izvor: Policia de Segurança Pública, Portugal

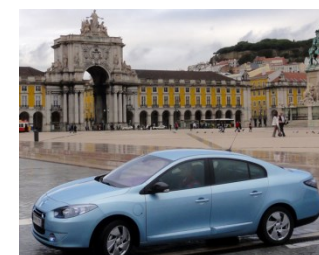


- **Renault Fluence Z.E. – 22 kWh**

po Renaultovim podacima, oko 4000 prodanih od 2011-2013



Izvor: INESC Porto



Izvor: Flickr

- **Tesla Model S – 60 ili 85 kWh**

ovisno o verziji; prodano oko 20.000 širom svijeta, od toga oko 1000 u Europi



Izvor: Tesla Motors

- **Doking Loox (xD) – 33 kWh**



Izvor: Doking

# • Koncept Vehicle to Grid – V2G

W. Kempton, J. Tomić (2005):

**Vehicle-to-grid power fundamentals:**

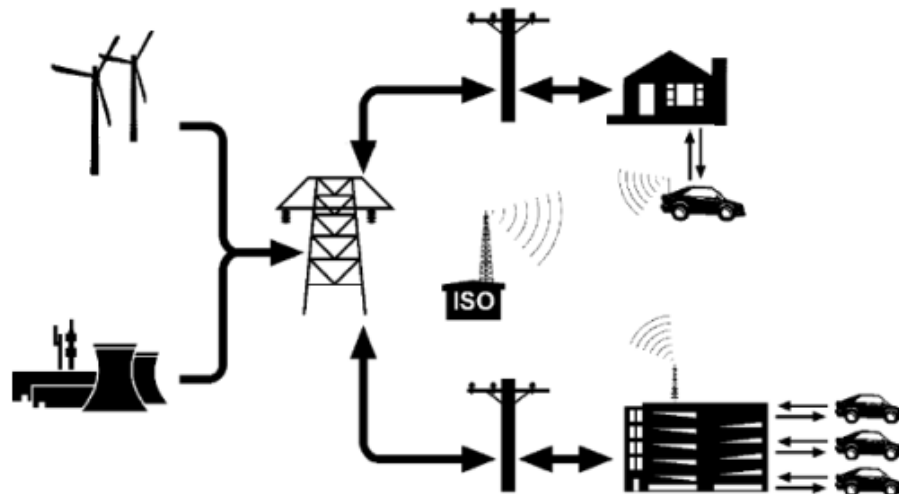
**Calculating capacity and net revenue**

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305000212>

J. Tomić, W. Kempton (2007)

**Using fleets of electric-drive vehicles for grid support**

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775307005575>



- dvosmjerna veza električnih vozila i elektroenergetskog sustava
- vozila mogu **vraćati energiju iz svojih spremnika u mrežu**
- preduvjet: podloga za komunikaciju i slanje signala
  - (cjenovnih, regulacijskih set pointa i slično)



---

# Ključna promjena koju spremnici unose u **analizu**

$$E_t = \int_{-\infty}^t (P_t - P_{L,t}(P_t, E_t)) dt$$

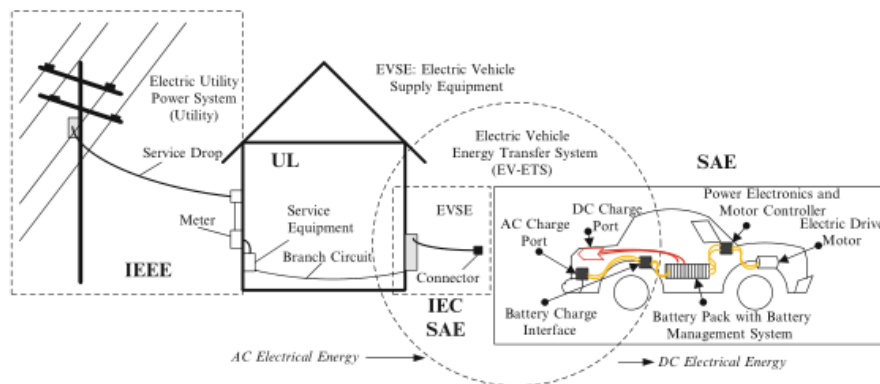
$E_t$  – energija u spremniku  
 $P_t$  – može biti i pozitivna i negativna ovisno o smjeru toka energije

$P_L$  – gubici (ovisni o snazi i spremljenoj energiji!)

- glavna promjena nastaje zbog integracijske karakteristike spremnika
  - jednostavnim rječnikom: **spremnik energije pamti** i ima specifičnu karakteristiku gubitaka
- posljedično: stanje sustava ne može se promatrati **snapshot** analizom
  - pošto stanje ovisi o povijesti - **ne može se promatrati izdvojeno!**
- praktično nije dovoljno promatrati slučajne varijable na ulazu bez kronologije!

## Spremnici zasnovani na V2G donose dodatne varijable u analizu:

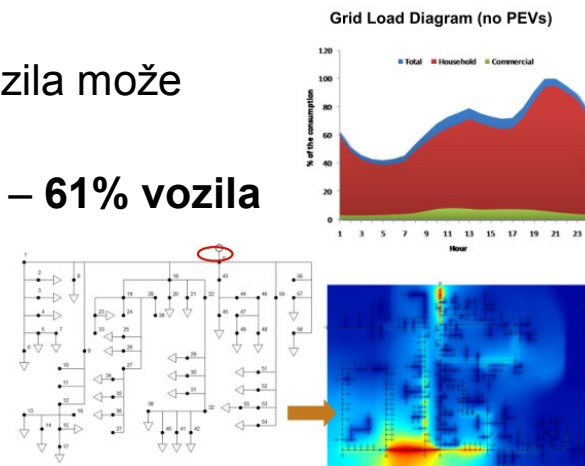
- važno: energija u spremniku EV primarno je namijenjena transportu a ne EES-u!
- *state of charge* – stanje napunjenosti baterije vozila i krivulju punjenja ovisnu o SoC
- **stohastičko ponašanje spremnika – stohastički spremnik**
  - osim količine energije pohranjene u spremniku - i njegove karakteristike su slučajne varijable
- komunikacijska infrastruktura nužan je preduvjet
  - kako komunicirati s kontrolerima u vozilima i vlasnicima vozila?
  - potrebna je standardizirana platforma za komunikaciju; niz međunarodnih standarda već je razvijen ili je u razvoju:
    - IEEE 901 za PLC broadband, **ISO 15118-1:2013** za *vehicle to grid communication*
    - IEEE 1547.3 za spajanje distribuiranih izvora na elektroenergetski sustav ...



Izvor: R. Garcia-Valle and J.A. Peças Lopes (eds.), **Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks**, Springer, 2013.

# S druge strane...problemi nisu nerješivi!

- primjer analize i primjene V2G u regulaciji frekvencije
  - University of Delaware: **A Test of Vehicle-to-Grid (V2G) for Energy Storage and Frequency Regulation in the PJM System**  
<http://www.udel.edu/V2G/resources/test-v2g-in-pjm-jan09.pdf>
- primjer analize sudjelovanja EV sa V2G u mreži i potrebnog pojačanja mreže:
  - niskonaponska mreža u Portugalu, 250 kućanstava, 9.2 MWh dnevno, 375 vozila
  - uz „dumb charging” – nekontrolirano punjenje – **11% vozila može biti EV**
  - „smart charging” uz poštivanje ograničenja u istoj mreži – **61% vozila bez potrebe za dodatnim pojačanjima mreže!**

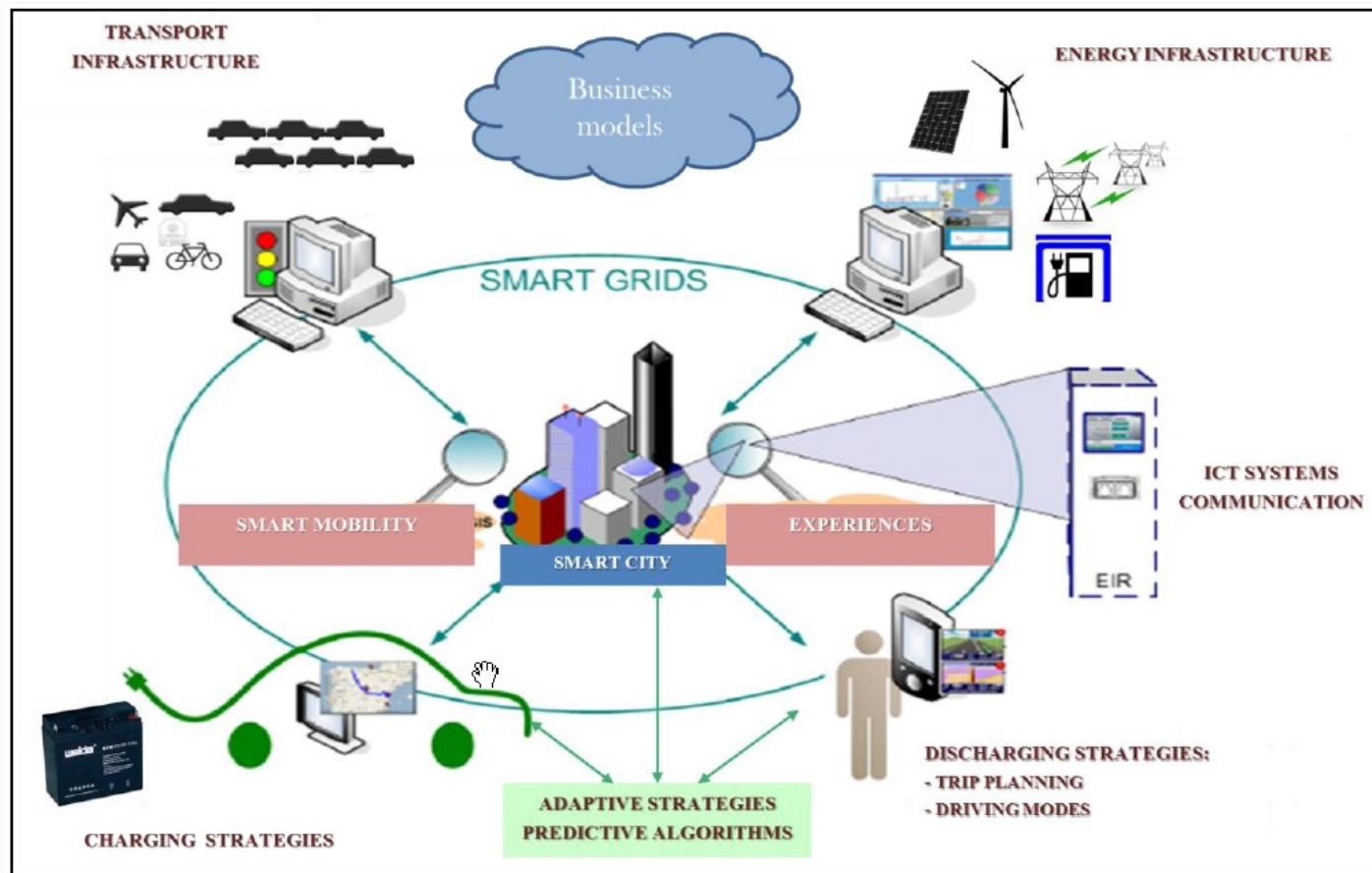


---

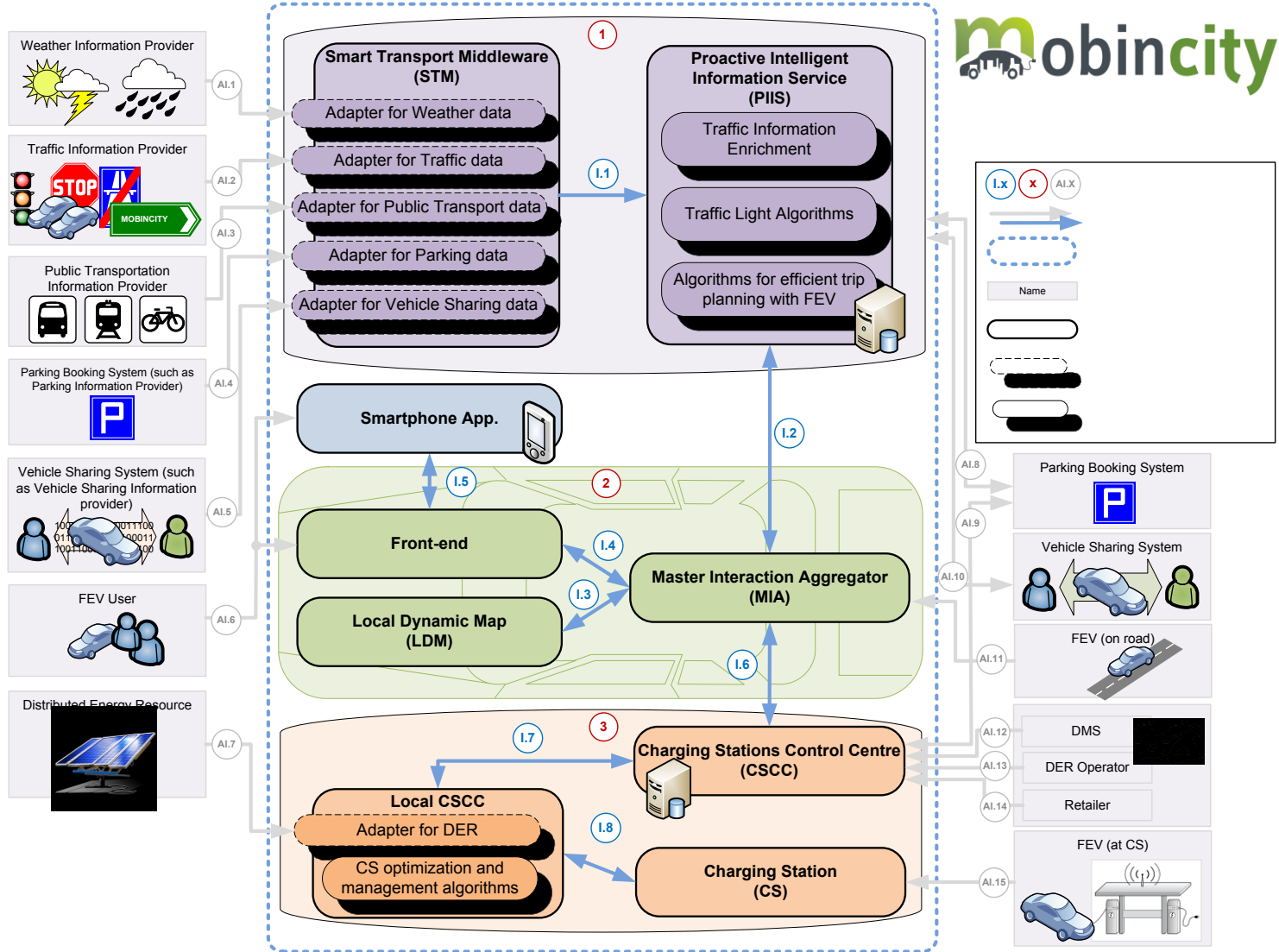
## S druge strane (2)...

- priprema **infrastrukture** za prihvat električne mobilnosti i naprednih mreža
  - EU FP7 projekti: MERGE i GRID4VEHICLES <http://www.ev-merge.eu/>
  - InovGrid i Évora Smart City projekt <http://www.edpdistribuicao.pt/pt/rede/InovGrid/Pages/InovGrid.aspx>
- inteligentne platforme za upravljanje transportom u gradovima
  - primjer - projekt MOBINCITY na kojemu i EIHP sudjeluje kao partner
- **regulatorni problemi** vezani za ekonomsko vrednovanje sudjelovanja EV u radu EES
  - kako potaknuti vlasnike da sudjeluju i pomažu radu EES?
  - agregatori kao „zastupnici” vlasnika EV na tržištu, neovisni o operatoru sustava
  - kako urediti rad u „normalnim” uvjetima, a kako u uvjetima poremećaja?
    - **Napredne mreže traže i naprednu regulaciju:**  
novi regulatorni okvir prilagođen novoj fleksibilnosti i novim uvjetima

# Projekt MOBINCITY: Smart Mobility in Smart City

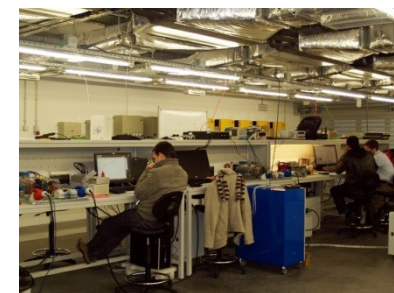
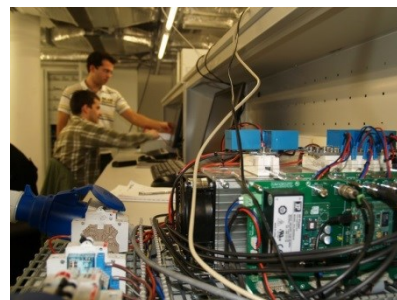
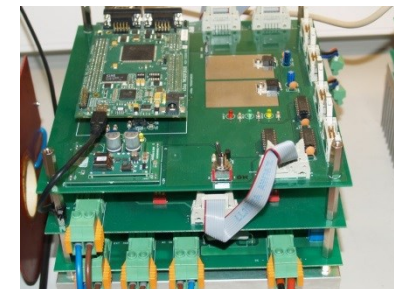


<http://www.mobincity.eu/>



# INESC Porto REIVE lab: **Redes Eléctricas Inteligentes e Veículos Eléctricos**

- laboratorij uspostavljen u 2012. pri INESC Porto, u Portu, Portugal
- tehnološka platforma za identifikaciju, specificiranje, razvoj, simulaciju i **praktično** testiranje inovativnih rješenja u elektroenergetici
- laboratorij usmjeren prema praktičnoj integraciji mikromreža i električnih vozila u današnji EES
- jedinstven u Europi i svijetu i usko vezan s poslijediplomskim doktorskim programom u programu MIT Portugal



video: <http://reive.inescporto.pt/pt/video>

---

## Ukratko – rekapitulacija:

- spremnici energije definitivno su područje od sve većeg interesa
  - interes regulatora, poticaji, gotova *plug and play* rješenja
- no - prikladna tehnologija pohrane ovisi o primjeni!
- kako adekvatno modelirati i poticati prikladnu ugradnju spremnika na razini mreže?
  - koliko i na kojim lokacijama?
  - ovisi o razini (financijskog i tehničkog) rizika i veličini spremnika
- električna mobilnost i *vehicle-to-grid*
  - utjecaj na analize, na prognoze, infrastrukturni utjecaj, izravno međudjelovanje prometnog sustava i elektroenergetskog sustava, regulatorne promjene ...



---

# Izbor korisnih materijala i poveznica

EPRI – Electric Power Research Institute i SANDIA National Laboratory:

**DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook**

<http://www.sandia.gov/ess/publications/SAND2013-5131.pdf>



Electricidade dos Açores: [www.eda.pt](http://www.eda.pt)

Green Islands Açores Project: <http://www.green-islands-azores.uac.pt/>



Laboratorij za napredne mreže i električnu mobilnost: **REIVE**

(Redes Eléctricas Inteligentes e Veículos Eléctricos), INESC TEC, Porto, Portugal

<http://reive.inescporto.pt/>



University of Delaware: The Grid-Integrated Vehicle with V2G Technology

<http://www.udel.edu/V2G/>

---

Hvala na pažnji!



Hrvoje Keko, dipl. ing.

[hkeko@eihp.hr](mailto:hkeko@eihp.hr)

