

MODELOVANJE I SIMULACIJA ELEKTRIČNIH VOZILA

Prvi dio

Prof. dr Srđan Lale

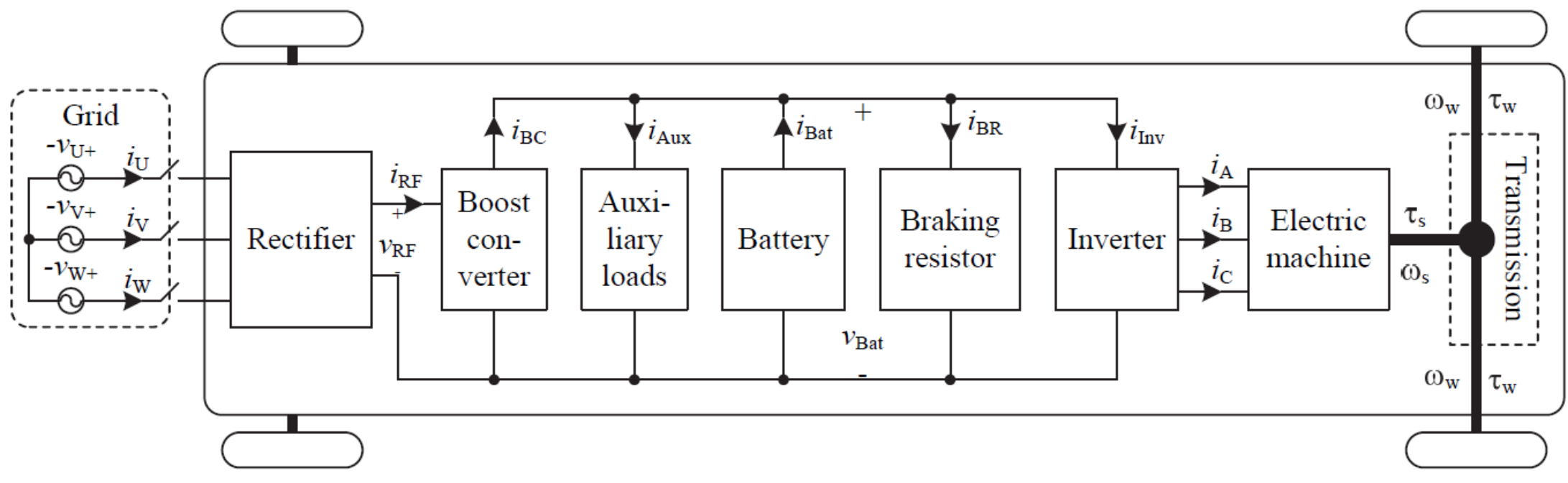
Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Elektrotehnički fakultet

Uvod

- ▶ Električna vozila (EV) su od strane mnogih viđeni kao automobili budućnosti, jer su vrlo efikasni, ne proizvode lokalnu zagađenost, tihi su i mogu se koristiti za regulaciju snage od strane operatera mreže.
- ▶ EV još uvijek imaju kritične probleme koje treba riješiti. Tri glavna izazova su ograničen domet vožnje, dugo vrijeme punjenja i visoka cijena. Ovi izazovi su svi povezani sa baterijskim sklopom automobila.
- ▶ Da bi se mogla procijeniti potrošnja energije EV, i testirati njegove karakteristike, veoma je važno imati dobar model (često nazvan digitalni blizanac) EV.
- ▶ Model EV je vrlo složen, jer sadrži mnogo različitih komponenti, npr., transmisija, električne mašine, energetska elektronika i baterije.

Modelovanje vozila - arhitektura

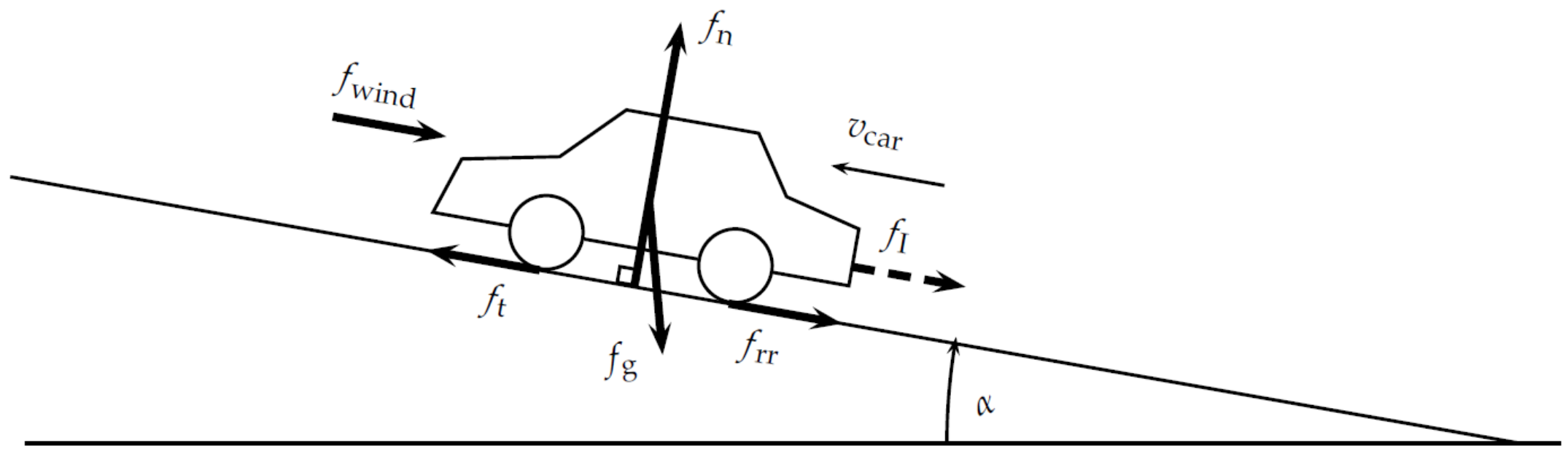
- Postoji mnogo različitih arhitektura električnog vozila, zbog mnogo mogućnosti, npr., 1 do 4 električne mašine, DC ili AC mašine, mjenjač/bez mjenjača, visoki ili niski napon baterije, punjenje pomoću jedne ili tri faze, itd.



Primjer arhitekture baterijskog EV

Modelovanje vozila - model sila

- Sile koje električna mašina vozila mora da savlada su sile zbog težine, vjetra, otpora pri kretanju i inercijalnog efekta.



Dijagram sila koje djeluju na automobil

Modelovanje vozila - model sila

- Sila vuče vozila može se opisati sljedećim jednačinama:

$$f_t = \underbrace{M_{\text{car}} \dot{v}_{\text{car}}}_{f_I} + \underbrace{M_{\text{car}} \cdot g \cdot \sin(\alpha)}_{f_g} + \text{sign}(v_{\text{car}}) \underbrace{\overbrace{M_{\text{car}} \cdot g \cdot \cos(\alpha)}^{f_n} \cdot c_{rr}}_{f_{rr}} + \underbrace{\text{sign}(v_{\text{car}} + v_{\text{wind}}) \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_{\text{drag}} A_{\text{front}} (v_{\text{car}} + v_{\text{wind}})^2}_{f_{\text{wind}}} \quad (1)$$

$$c_{rr} = 0.01 \left(1 + \frac{3.6}{100} v_{\text{car}} \right), \quad (2)$$

Modelovanje vozila - model sila

where f_t	[N]	Traction force of the vehicle
f_I	[N]	Inertial force of the vehicle
f_{rr}	[N]	Rolling resistance force of the wheels
f_g	[N]	Gravitational force of the vehicle
f_n	[N]	Normal force of the vehicle
f_{wind}	[N]	Force due to wind resistance
α	[rad]	Angle of the driving surface
M_{car}	[kg]	Mass of the vehicle
v_{car}	[m/s]	Velocity of the vehicle
$\dot{v}_{car}$	[m/s ²]	Acceleration of the vehicle
$g = 9.81$	[m/s ²]	Free fall acceleration
$\rho_{air} = 1.2041$	[kg/m ³]	Air density of dry air at 20 °C
c_{rr}	[—]	Tire rolling resistance coefficient
C_{drag}	[—]	Aerodynamic drag coefficient
A_{front}	[m ²]	Front area
v_{wind}	[m/s]	Headwind speed

Modelovanje vozila - pomoćna opterećenja

- Moderni automobil ima i druga opterećenja koje baterija treba da snabdijeva. Ta opterećenja su ili zbog sigurnosti, npr., svjetla, brisači, sirena, itd., i/ili udobnosti, npr., radio, grijanje, klima uređaj, itd.

Radio	52 W
Heating Ventilation Air Condition (HVAC)	489 W
Lights	316 W
Total p_{Aux}	857 W

Primjer prosječnog nivoa snaga pomoćnih opterećenja vozila

Modelovanje vozila - transmisija

- Obrtni moment, rotaciona brzina i snaga sistema transmisije su dati sljedećim jednačinama:

$$\tau_t = f_t r_w \quad (3)$$

$$\tau_w = \frac{\tau_t}{2} \quad (4)$$

$$\omega_w = \frac{v_{\text{car}}}{r_w} \quad (5)$$

$$p_t = f_t v_{\text{car}}, \quad (6)$$

Modelovanje vozila - transmisija

where τ_t [Nm] Traction torque
 τ_w [Nm] Torque of each driving wheel
 r_w [m] Wheel radius
 ω_w [rad/s] Angular velocity of the wheels
 p_t [W] Traction power

$$\tau_s = \begin{cases} \eta_{TS} \frac{\tau_t}{G} , & p_t < 0 \\ \frac{\tau_t}{\eta_{TS} G} , & p_t \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_s = G \omega_w \quad (8)$$

$$p_s = \tau_s \omega_s, \quad (9)$$

where τ_s [Nm] Shaft torque of electric machine
 ω_s [rad/s] Shaft angular velocity of electric machine
 p_s [W] Shaft power of electric machine
 G [—] Gear ratio of differential

Modelovanje vozila - električna mašina

- ▶ Za pogon EV se obično koriste asinhroni motor, motor sa permanentnim magnetom i motor sa promjenljivom reluktansom.
- ▶ Najbolji izbor je, kao i kod mnogih drugih komponenti, kompromis između cijene, mase, zapremine, efikasnosti, pouzdanosti, održavanja, itd.
- ▶ Zbog svoje visoke gustine snage i visoke efikasnosti, motor sa permanentnim magnetom je izabran kao primjer.
- ▶ Model električne mašine se dijeli na električni i mehanički dio.
- ▶ Električni dio motora sa permanentnim magnetom se modeluje u DQ-sistemu:

Modelovanje vozila - električna mašina

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (10)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda_{pm} \quad (11)$$

$$p_{EM} = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) , \quad (12)$$

Modelovanje vozila - električna mašina

where	v_d	[V]	D-axis voltage
	v_q	[V]	Q-axis voltage
	i_d	[A]	D-axis current
	i_q	[A]	Q-axis current
	R_s	[Ω]	Stator phase resistance
	L_d	[H]	D-axis inductance
	L_q	[H]	Q-axis inductance
	λ_{pm}	[Wb]	Permanent magnet flux linkage
	ω_e	[rad/s]	Angular frequency of the stator
	λ_{pm}	[Wb]	Permanent magnet flux linkage
	p_{EM}	[W]	Electric input power

Modelovanje vozila - električna mašina

- Mehanički dio motora sa permanentnim magnetom može se modelovati na sljedeći način:

$$\tau_e = J_s \frac{d\omega_s}{dt} + B_v \omega_s + \tau_c + \tau_s \quad (13)$$

$$p_s = \tau_s \omega_s, \quad (14)$$

where	J_s	$[\text{kgm}^2]$	Shaft moment of inertia
	τ_e	$[\text{Nm}]$	Electromechanical torque
	τ_c	$[\text{Nm}]$	Coulomb torque
	B_v	$[\text{Nms/rad}]$	Viscous friction coefficient

Modelovanje vozila - električna mašina

- Spoj između električnog i mehaničkog dijela motora je dat sa:

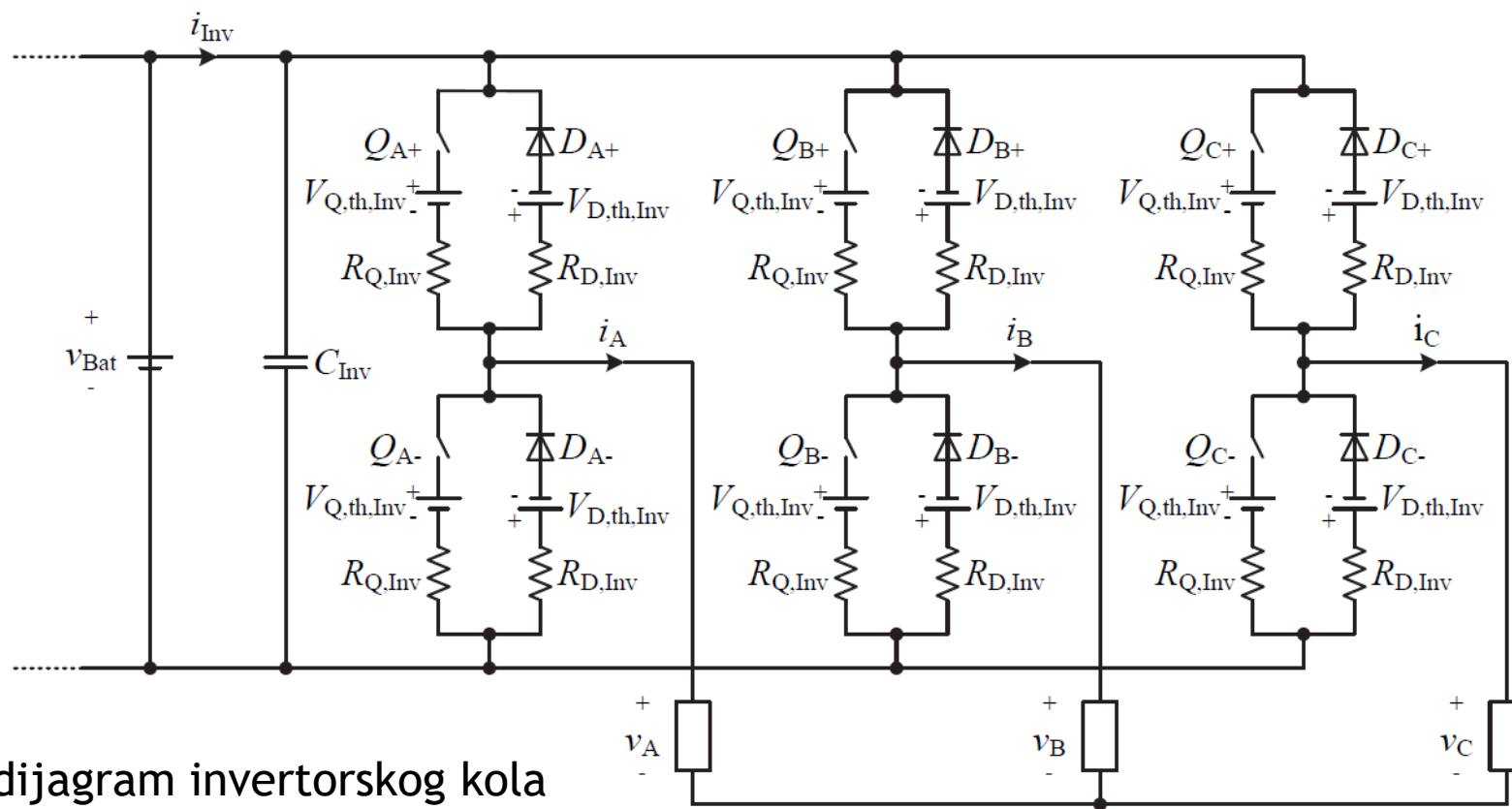
$$\tau_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (15)$$

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_s, \quad (16)$$

where P $[-]$ Number of poles

Modelovanje vozila - inverter

- Inverter prenosi snagu između električne mašine (sa faznim naponom v_A , v_B , i v_C) i baterije uključivanjem i isključivanjem prekidača Q_{A+} , Q_{A-} , Q_{B+} , Q_{B-} , Q_{C+} , i Q_{C-} .



Šematski dijagram invertorskog kola

Modelovanje vozila - inverter

- Srednji gubici snage jednog prekidača $p_{Q,Inv}$ i dioda $p_{D,Inv}$ tokom jednog osnovnog perioda su:

$$p_{Q,Inv} = \left(\frac{1}{8} + \frac{m_i}{3\pi} \right) R_{Q,Inv} \hat{I}_p^2 + \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m_i}{8} \cos(\phi_{EM}) \right) V_{Q,th,Inv} \hat{I}_p \quad (17)$$

$$p_{D,Inv} = \left(\frac{1}{8} - \frac{m_i}{3\pi} \right) R_{D,Inv} \hat{I}_p^2 + \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{m_i}{8} \cos(\phi_{EM}) \right) V_{D,th,Inv} \hat{I}_p \quad (18)$$

$$m_i = \frac{2\hat{V}_p}{V_{Bat}}, \quad (19)$$

Modelovanje vozila - inverter

where	$p_{Q,Inv}$	[W]	Power loss of one switch
	$p_{D,Inv}$	[W]	Power loss of one diode
	ϕ_{EM}	[rad]	Power factor angle
	$\hat{I}_p$	[A]	Peak phase current
	$\hat{V}_p$	[V]	Peak phase voltage
	m_i	[—]	Modulation index
	V_{Bat}	[V]	Battery voltage
	$R_{Q,Inv}$	[Ω]	Inverter switch resistance
	$R_{D,Inv}$	[Ω]	Inverter diode resistance
	$V_{Q,th,Inv}$	[V]	Inverter switch threshold voltage
	$V_{D,th,Inv}$	[V]	Inverter diode threshold voltage

Modelovanje vozila - inverter

- Ukupni gubitak snage invertora dat je sa:

$$P_{\text{Inv,loss}} = 6 (P_{\text{Q,Inv}} + P_{\text{D,Inv}}) = \frac{3}{2} R_{\text{Inv}} \hat{I}_{\text{p}}^2 + \frac{6}{\pi} V_{\text{th,Inv}} \hat{I}_{\text{p}}. \quad (20)$$

- Ulazna snaga invertora i efikasnost su:

$$p_{\text{Inv}} = v_{\text{Bat}} i_{\text{Inv}} = p_{\text{EM}} + p_{\text{Inv,loss}} \quad (21)$$

$$\eta_{\text{Inv}} = \begin{cases} \frac{p_{\text{EM}}}{p_{\text{Inv}}} , & p_{\text{EM}} \geq 0 \\ \frac{p_{\text{Inv}}}{p_{\text{EM}}} , & p_{\text{EM}} < 0, \end{cases} \quad (22)$$

where i_{Inv} [A] Inverter input current
 p_{Inv} [W] Inverter input power
 η_{Inv} [—] Inverter efficiency

Modelovanje vozila - baterija

- ▶ Baterija je „srce“ električnog vozila.
- ▶ Postoji mnogo različitih tipova baterija, npr., olovne, nikl-metal-hidridne, litijum-jonske, itd.
- ▶ Danas, litijum-jonske baterije su preferirani izbor zbog svoje relativno visoke specifične energije i snage.
- ▶ Kao primjer, model baterije će se zasnivati na Saft VL 37570 litijum-jonskoj ćeliji.
- ▶ Biće predstavljeni električni i kapacitivni modeli baterija.

Modelovanje vozila - baterija

Maximum voltage	$V_{\text{Bat,max,cell}}$	4.2 V
Nominal voltage	$V_{\text{Bat,nom,cell}}$	3.7 V
Minimum voltage	$V_{\text{Bat,min,cell}}$	2.5 V
1 h capacity	$Q_{1,\text{cell}}$	7 Ah
Nominal 1 h discharge current	$I_{\text{Bat,1,cell}}$	7 A
Maximum pulse discharge current	$I_{\text{Bat,max,cell}}$	28 A

Kataloške specifikacije Saft VL 37570 litijum-jonske baterije