

# Calcul d'un module de supercondensateurs pour une application tram

Dans cet exercice nous allons calculer la dimension d'un module de supercondensateur pour alimenter les moteurs d'un tram.

## A) Hypothèse du problème

### **Le tram:**

m: masse du véhicule = 100'000 kg

V: vitesse du véhicule = 50km/h = 13.89 m/s

a: le tram accélère de 0 à 50 km/h toutes les 3 minutes pendant 18 heures par jour, 365 jours par année.

Le véhicule doit atteindre sa vitesse nominale en  $t = 10$  s à puissance constante.

La tension d'utilisation du module est de 560 V.

### **Les supercondensateurs:**

Les supercondensateur à utiliser ont les caractéristiques suivantes:

Capacité cellule:  $C_{sc} = 3000$  F

Tension max cellule:  $U_n = 2.5$  V

Résistance série:  $R_s = 0.4$  mOhm

## B) Résolution

### 1) Calcul de la quantité de CO<sub>2</sub> produite

Gasoil:  $C_{21}H_{44}$

H  $MA_H = 1$  g/mole

C  $MA_C = 12$  g/mole

N  $MA_N = 14$  g/mole

O  $MA_O = 16$  g/mole

$C_{21}H_{44} \Rightarrow MA_{\text{gasoil}} = 296$  g/mole

$CO_2 \Rightarrow MA_{CO_2} = 44$  g/mole

$H_2O \Rightarrow MA_{H_2O} = 18$  g/mole

Nbre de mole dans 1 kg de gasoil:  $N = 1 / MA_{\text{gasoil}}$

La combustion de 1 kg de gasoil = 3.37 moles avec l'oxygène de l'atmosphère produit:

$CO_2 : 21 * N * MA_{CO_2} = 21 * 3.37 * 44 = 3.1$  kg

$H_2O : 44 / 2 * N * MA_{H_2O} = 22 * 3.37 * 18 = 1.3$  kg.

Contenu énergétique du gasoil : 12 kWh/kg

$\Rightarrow$  Production de  $M_{CO_2} = 0.25$  kg de  $CO_2$  par kWh

### 2) Besoin énergétique annuel

$E_c =$  Energie cinétique du véhicule en translation  $E_{cin} = \frac{1}{2} m * V^2$

$$E_c = 0.5 * 100'000 * 13.89^2 = 9'646'605 \text{ Joules}$$

A 50 km/h le tram a donc une énergie cinétique de 9.6 MJoules = 2,7 kWh.

Calculons à présent les différentes pertes du système.

L'énergie totale utilisée par année pour accélérer le véhicule est de:

$$E_a = E_{cin} * 365 * 18 * 60 / 3 = 350'000 \text{ kWh}$$

### 3) Economie potentielle annuelle

Les constructeur annonce une économie d'énergie de 30% avec le module de supercondensateurs, ce qui représente une économie de 100'000 kW, de 25 tonnes de CO<sub>2</sub> et de 10'000 € (à 0.1 €/kWh) par année.

### 4) Capacité du module

En partant de la tension d'utilisation maximum donnée de  $U = 560 \text{ V}$ ,

de l'expression de l'énergie maximum d'un condensateur  $E = 0.5 * C_m * U_{op} * U_{op}$ ,

et du fait que seul  $\frac{3}{4}$  de l'énergie est disponible entre  $U/2$  et  $U$

on obtient une capacité de module nécessaire de

$$C_m = 2 * E_{cin} / U_{op} / U_{op} * 4 / 3 = 2 * 9'646'605 / 560 / 560 * 4 / 3 = 82 \text{ F}$$

Le nombre de condensateurs en série  $N_s = U_{max} / U_n = 560 / 2.5 = 224$ .

Avec des supercondensateurs de 3000 F, le nombre d'éléments en parallèle est de  $N_p = C_m * N_s / C_{sc} = 6$

Au total il y a  $N_{sc} = N_s * N_p = 224 * 6 = 1344$  éléments dans l'installation.

Vérification:  $C_m = 3000 * 6 / 224 = 80.35 \text{ F}$ . Il manque effectivement 3% de capacité pour être parfaitement exacte...

### 5) Puissance véhicule

La puissance nécessaire pour accélérer le véhicule à puissance constante dans le temps  $t$  requis doit être de

$$P = E_{cin} / t = 9.6 / 10 \text{ MJoules/s} = 960 \text{ kW}$$

La puissance maximum que pourrait un supercondensateur dans une impédance adaptée, i.e.

Une résistance de charge égale à la résistance interne, est de

$$P_m = U^2 / 4 R_s = 2.5 * 2.5 / 4 / 0.0004 = 3'906 \text{ W par condensateur.}$$

Pour le module  $P_{mm} = 1344 * P_m = 5'250 \text{ kW}$ .

### 6) Efficacité

En utilisant les résultats du calcul effectué pour déterminer la courbe de Ragone, il vient que:

le rendement est égal à l'énergie disponible pour la charge sur l'énergie emmagasinée  
 $\beta = W_L / W_{max} = \frac{1}{2} (1 + \text{RACINE}(1 - P_L/P_m)) = 0.5 (1 + \text{Racine}(1 - 960 / 5'250)) = 95.2\%$

### 7) Courant

Le courant est maximum lorsque la tension est minimum. Pour des raisons pratiques découlant des performances limitées de l'électronique de puissance, le stockeur est utilisé entre la tension d'opération maximum et la moitié de cette valeur; dans notre cas entre 2.5 V et 1.25 V. Au début de l'accélération la situation idéale est d'avoir un stockeur complètement chargé.

Calcul du courant lors de la décharge du stockeur:

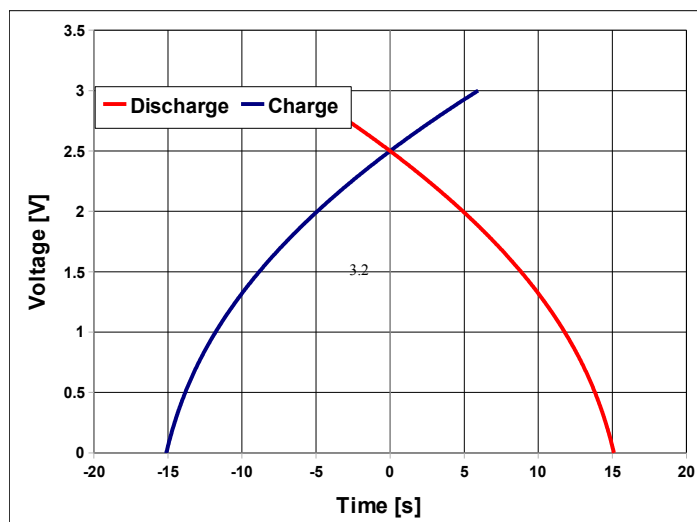
$$i = C \, du_c/dt$$

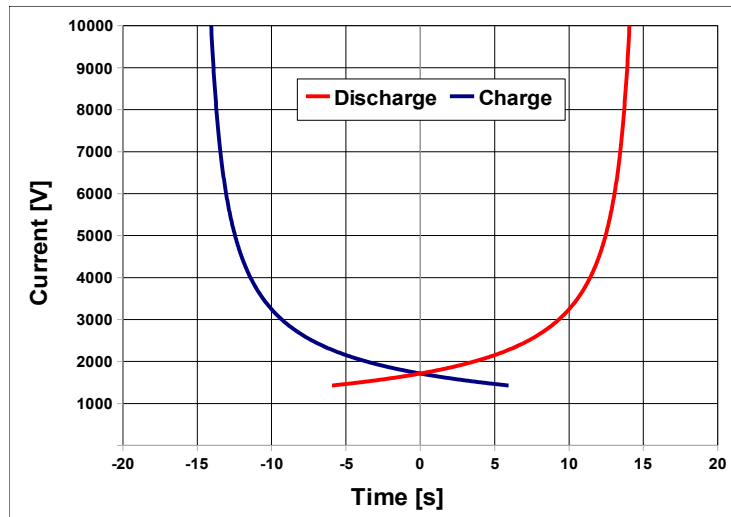
$$P_L = u_L * i = \text{cste} = 960 \text{ kW}$$

$$R_s \, u_c'(t)^2 + \frac{1}{C} u_c u_c'(t) - P_L = 0$$

où  $P_L$  est la puissance de la charge,  $u_L$  la tension de la charge,  $u_c$  la tension de la capacité,  $R_s$  la résistance série interne du supercondensateur.

$$\frac{4P_L R_s C^2 \ln\left(C \sqrt{\frac{u_c^2}{C^2} + 4R_s P_L} + u_c\right) + u_c \left(C \sqrt{\frac{u_c^2}{C^2} + 4R_s P_L} + u_c\right)}{4CP_L} du_c = t + \text{const}$$





Cas particulier:

$$\text{A } t_1 = 0\text{s, } u_c = U_{op} \Rightarrow i_{min} = P/U = 960'000/560 = 1714 \text{ A} \Rightarrow 286 \text{ A par scap}$$

$$\text{A } t_2 = 10\text{s, } u_c = U_{op}/2 \Rightarrow i_{max} = 2 * i_{min} = 3429 \text{ A} \Rightarrow 571 \text{ A par scap}$$

### C) Verification

Capacité module:  $C_m = C_{sc} * N_p / N_s = 3000 \text{ F} * 6 / (1344/6) = 36 * 3000 / 1344 = 80.35 \text{ F}$

Energie module :  $E_{max} = N_c * 0.5 C_c * U_{max} * U_{max} = 1344 / 2 * 2.7 * 2.7 = 3.5 \text{ kWh}$

Energie utilisable:  $E = \frac{3}{4} E_{max} = 2.6 \text{ kWh}$  pour travailler entre  $U_{op}$  et  $U_{op}/2$

Puissance max module:  $P_m = N_c * U * U / 4 / R_s = 1344 * 2.5 * 2.5 / 4 / 0.0004 = 5 \text{ MW}$

Il s'agit de la puissance maximum au début de la décharge ou à la fin de la charge dans une impédance égale à la résistance série. Dans cette situation le rendement est d'à peine 50% car la moitié de l'énergie est dissipée à l'intérieur du module.

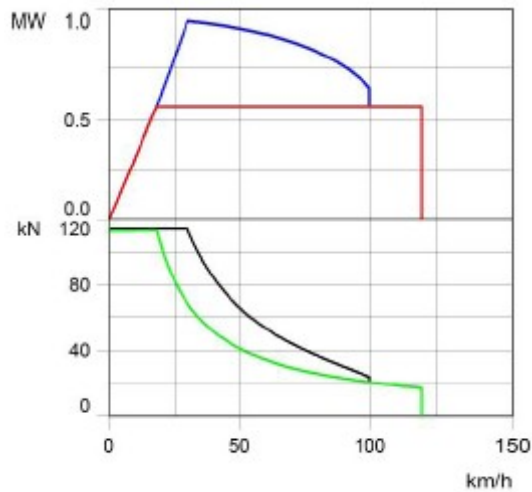
### D) Solution économiseur d'énergie Mitrac de Bombardier

- Add. power to reach same performance of 3car and 4car unit
  - 3car unit (2\*662kW) 10,6 kW/t
  - 4car unit without ES (2\*662kW) 8,2 kW/t
  - 4car unit with ES 9-12 kW/t

e.g. DEMU with ES Energy Storage (9kWh)



Les supercondensateurs sont utilisés comme puissance aditionnelle pour accélérer le tram de à partir de 20 km/h. Les moteurs diesel fournissent 630 kW. Les supercondensateurs fournissent



- **3 part train**
  - app. 100 t
  - 2\*315 kW diesel power packs
- **4,4 kWh MITRAC Energy Saver**

jusqu'à 300 kW, ce qui représente approximativement le 30 % de la puissance totale.

### E) Solution Siemens Sitras

Tension max: 750 V

Tension utilisation: 560 V

Tension auxiliaire: 3 AC 400 V

Nbre supercondensateurs: 1344

Nbre parallèle: 6

Capacité cellule: 3000 F

Résistance série avec connexions: 0.0004 mOhm

Tension max cellule: 2.7 V

Tension d'utilisation max: 2.5 V

Capacité module: 80 F

Energie utilisable module: 2.5 kWh

Energie économisée par heure: 80 kWh/h

Puissance pic: 1 MW

### Technical data

Input voltage (tolerance range according to EN 50163)	[V DC]	600	750
Total number of double-layer capacitors		1,050	1,344
Total capacity	[F]	103	80
Usable energy content	[kWh]	1.7	2.5
Maximum energy saving possible per hour	[kWh/h]	50	80
Peak power	[MW]	1	1
Auxiliaries supply	[V]	3 AC 400	3 AC 400
Permissible ambient temperature	[°C]	-20...+40	-20...+40
Maximum operating height above sea level*	[m]	2,000	2,000
Dimensions of the four double cubicles (Width x Depth x Height)			
- Cubicle +S1/+S2 and +S3/+S4	[m]	1.4 x 0.7 x 2.7	1.4 x 0.7 x 2.7
- Cubicle +S5/+S6 and +S7/+S8	[m]	1.2 x 0.9 x 2.7	1.2 x 0.9 x 2.7
Weight	[t]	approx. 4.0	approx. 4.3

