

IMPORTANT : Soigner la présentation de votre copie ! Cela entrera dans la notation.

Une feuille de notes personnelles recto-verso et une calculatrice sont autorisées, voire conseillées.

0 - CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET DONNEES

Cette étude concerne l'étude de l'entraînement électrique d'une formule 1 (F1), dans le cadre du règlement de 2014. Celui-ci autorise une récupération d'énergie de 2 MJ par tour lors des freinages par une machine électrique. Le système de stockage associé ne peut dépasser 25 kg et il a été choisi pour cette étude de le dimensionner pour qu'il puisse stocker et fournir une énergie totale de 2 MJ. Bien que cela ne soit pas la solution généralement utilisée, cette étude vise notamment à vérifier s'il serait possible d'utiliser des supercondensateurs comme système de stockage.

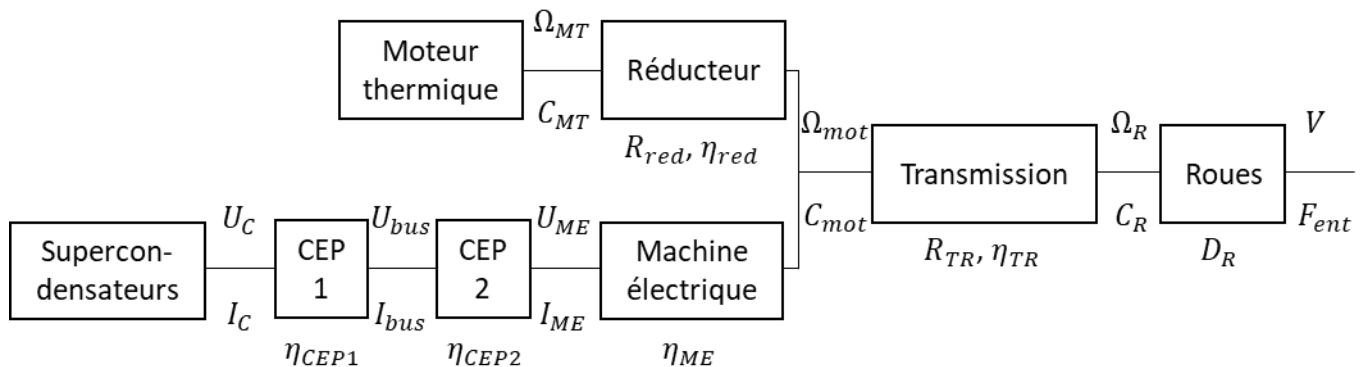


Figure 1 : Schéma synoptique de l'entraînement hybride de cette étude pour une F1

Données diverses

- Vitesse maximale de la F1 : $V_{max} = 350 \text{ km/h}$;
- Diamètre des roues : $D_R = 70 \text{ cm}$;
- Rendement transmission : $\eta_{TR} = 0.97$
- Masse de la F1 : $M_{F1} = 700 \text{ kg}$

La machine électrique utilisée dans cette motorisation hybride est de type **synchrone triphasée à aimants permanents**. Quelques-unes de ses principales caractéristiques ont été reportées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : caractéristiques constructeur de la machine électrique (*extraits*)

EMRAX 268 Low voltage CC			
Tension batterie	250 V (continu)	Vitesse maximale	4500 tr/min
Puissance nominale	107 kW	Puissance maximale	200 kW
Couple nominal	250 Nm	Couple maximal	500 Nm
Constante de couple (courant efficace d'une phase)	0,46 Nm/A	Rendement	93 %
Facteur de puissance	0,85 ($\varphi = 32^\circ$)	Nombre de pôles	10 paires
Résistance R d'un bobinage	1,8 mΩ	Inductance L (bobinage)	17 μH

1 – PARTIE MECANIQUE (20 MIN)

1.1 Donner le rapport de réduction R_{TR} entre l'axe de la machine électrique et l'axe des roues pour que la F1 atteigne sa vitesse maximale lorsque la machine électrique est à sa vitesse maximale.

Réponse : Détermination de la vitesse des roues à 350 km/h : $\Omega_R = V * \frac{2}{D_R} = 278 \text{ rd/s}$

Puis calculer le ratio entre la vitesse du moteur et des roues $R_{TR} = \frac{471}{278} = 1,70$

1.2 Selon les règles 2014, le freinage récupératif est limité à 120 kW mécanique au niveau de la machine électrique. Donner le couple de freinage maximal autorisé pour la machine électrique à des vitesses de 350 km/h et de 150 km/h.

Répons : $C_{ME} = P_{ME}/\Omega_{ME}$; Cela donne **255 Nm à 350 km/h et 594 Nm à 150 km/h** (obtenu soit par une règle de trois, soit en calculant la vitesse de rotation moteur à 150 km/h).

1.3 A 350 km/h, quelle est la force correspondante à ce freinage du point de vue de la F1 ?

Réponse : La relation entre la force au niveau de la F1 et le couple moteur s'écrit : $F = C_{ME} \times R_{TR} \times \frac{2}{D_R} / \eta_{TR}$

Soit une force $F = -1272 \text{ N}$ (pas de point en moins si positif)

1.4 En négligeant toutes les autres forces, quelle serait la décélération correspondante ?

Réponse : cela correspond à une décélération de $\gamma = \frac{F}{M} = -\frac{1272}{700} = -1,82 \text{ m/s}^2$

2 – ÉTUDE DE LA MACHINE ELECTRIQUE (25 MIN)

2.1 Calculer les valeurs des courants efficaces d'une phase I_{ME} de la machine électrique correspondant aux freinages électriques à 350 km/h et à 150 km/h (cf. question 1.2). La machine peut-elle les supporter ?

Réponse : on peut se baser sur les couples calculés en 1.2 et sur la constante de couple.

$I_{ME} = C_{ME} / k_c$ ce qui donne **554 A à 350 km/h et 1292 A à 150 km/h.**

La machine ne peut pas freiner à 120 kW à 150 km/h. Il faut se baser sur le couple max (500 Nm) pour avoir le courant max. On peut aussi simplement se baser sur le couple calculé à la question 1.2.

2.2 Rappeler l'expression de la puissance électrique en alternatif triphasé. Préciser ce que représente chaque grandeur.

Réponse : $P_{elec} = \sqrt{3} \times U_{eff} \times I_{eff} \times \cos(\varphi)$

Les prochaines questions portent sur le point de fonctionnement suivant : freinage de 120 kW mécanique à vitesse maximale.

2.3 Donner la valeur efficace de la tension composée entre deux phases U_{ME} de la machine électrique, puis la valeur efficace de la tension simple d'une phase V_{ME} .

Réponse : On est au même point qu'à la question 2.1 à 350 km/h, donc le courant efficace sur une phase est de 554 A. La puissance électrique vaut $P_{elec} = P_{meca} \times \eta_{mot} = 111,6 \text{ kW}$ (en mode générateur).

D'après l'expression de la puissance en triphasé, la tension composée est : $U_{ME,eff} = \frac{P_{elec}}{\sqrt{3} \times I_{eff} \times \cos(\varphi)} = 137 \text{ V}$

La tension simple efficace vaut alors **79,0 V.**

2.4 L'une des « phases » de la machine électrique peut être modélisée par le circuit électrique équivalent de la figure 2. Donner les valeurs efficaces des tensions U_R et U_L (voir formulaire page 3).

Réponse : $U_{R,eff} = R I_{ME,eff} = 1,00 \text{ V}$; $U_{L,eff} = \omega l = L \Omega p I = 17 \cdot 10^{-6} \times 471 \times 10 \times 554 = 44,3 \text{ V}$

2.5 Reproduire le diagramme de Fresnel de la figure 3 sur votre copie en respectant l'échelle suivante (1 cm/20 V et 1 cm/100 A). Compléter ce diagramme avec les tensions U_L et E (U_R est supposé négligeable).

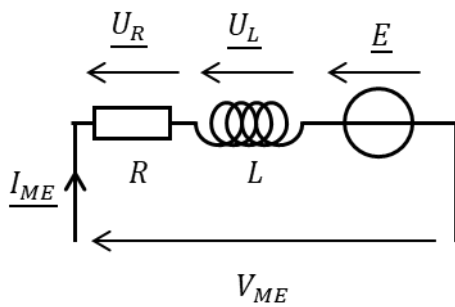


Figure 2 : circuit équivalent pour une phase

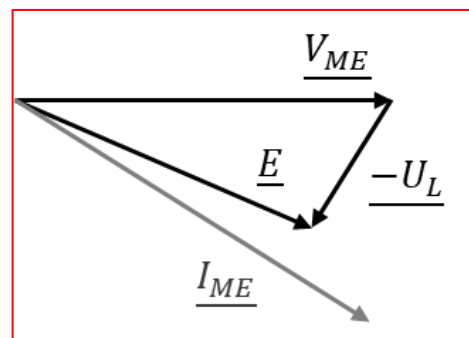


Figure 3 : diagramme de Fresnel incomplet

3 – ÉTUDE DU CONVERTISSEUR ELECTRONIQUE DE PUISSANCE (20 MIN)

Des modules de supercondensateurs 6 Farad/160 V sont disponibles au catalogue de la société Maxwell Technologies (cf. photographie). Ils supportent 170 A maximum et pèsent 5,1 kg.

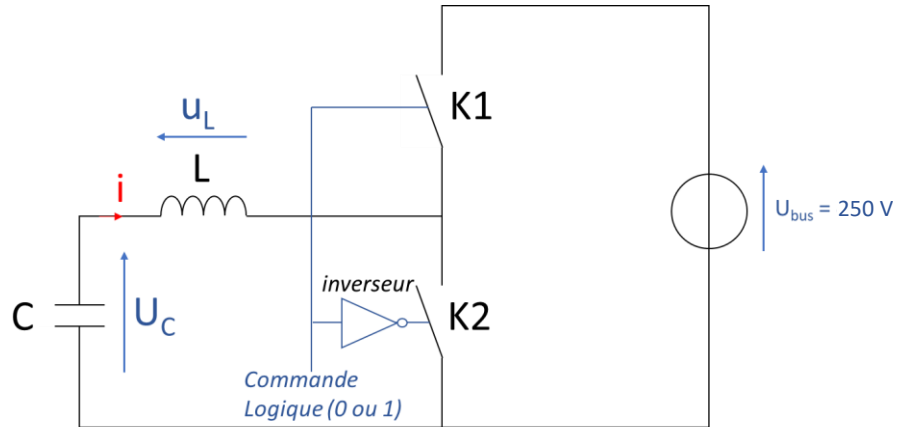


Le système de traction électrique de la F1 est alimenté par un bus continu fixé à $U_{bus} = 250 V$ tandis que la tension (continue) U_C aux bornes du pack de supercondensateurs varie entre 160 V et 20% de cette valeur.

3.1 De quel type doit être le convertisseur « CEP1 » entre le pack de supercondensateurs et le bus continu ?

Réponse : Un **convertisseur DC/DC (un hacheur)**

Le bus continu à 250 V étant modélisé par une source de tension idéale et les supercondensateurs étant eux aussi des sources de tension (au sens de l'électronique de puissance), l'ajout d'une bobine en série avec le module, conformément à la figure 4, est obligatoire.



Indication : Un interrupteur K est passant si sa commande est à 1 et est bloqué (ouvert) si sa commande est à 0.

Figure 4 : schéma électrique du CEP1

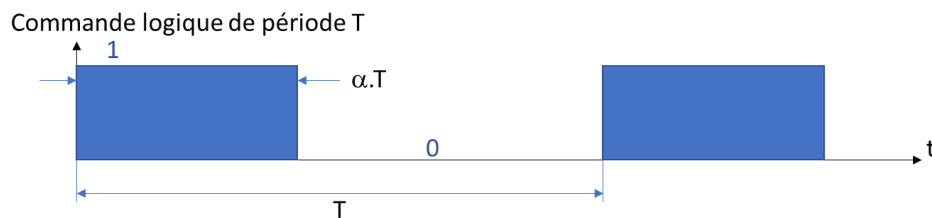


Figure 5 : graphe représentant la commande de l'interrupteur K1

3.2 Pourquoi les commandes de K1 et K2 doivent être inversées ?

Réponse : Il ne faut **pas court-circuiter la source de tension U_{bus}** en sortie (la config. K1 et K2 « ON » est interdite).

Il ne faut **pas non plus ouvrir le circuit de la bobine en entrée** (la config. K1 et K2 « OFF » est interdite).

Les tensions U_C et U_{bus} sont supposées constantes sur une période de découpage T .

3.3 Quelles sont les valeurs de u_L durant une période de découpage T ? En admettant qu'un régime périodique soit atteint, donner la valeur moyenne de u_L .

Répons : Sur l'intervalle $[0 ; \alpha.T]$, on a $u_L = U_C - U_{bus}$

Sur l'intervalle $[\alpha.T ; T]$, on a $u_L = U_C$

La **tension moyenne aux bornes de L est nulle** sur une période de découpage.

3.4 En déduire la valeur de U_C en fonction de U_{bus} et α .

Réponse : $U_C = \alpha U_{bus}$

3.5 Donner les valeurs minimale et maximale du rapport cyclique α pour une variation de U_C entre 160 V et 20% de cette tension.

Réponse : $\alpha = 0.64$ pour 160V

$\alpha = 0.128$ pour $0.2 * 160 = 32V$

4 – DIMENSIONNEMENT D'UN PACK DE SUPERCONDENSATEURS (25 MIN)

Les supercondensateurs sont caractérisés par une tension nominale (160 V) et une capacité C (de forte valeur par rapport à des condensateurs classiques mais avec un comportement identique). Notamment, l'énergie E_C qu'ils contiennent s'exprime par $E_C = 0,5 C U_C^2$.

4.1 Si l'on considère que le condensateur est utilisé entre 100% et 20% de sa tension nominale U_{nom} , donner l'expression de son énergie utilisable ?

Réponse : $E_{utilisable} = \frac{1}{2} * C * (U_{nom}^2 - (0.2 * U_{nom})^2) = 0.96 * E_C$

4.2 En déduire l'énergie qui peut être utilisée pour un seul module 6 Farad/160 V, puis le nombre de modules à mettre en parallèle pour avoir l'énergie souhaitée pour la F1.

Réponse : $E_{module} = 0.96 * \frac{1}{2} * C * U_{nom}^2 = 73728 J$

Pour atteindre 2 MJ, il faut donc **28 modules** ($2 MJ / E_{module} = 27,1$)

4.3 Donner le courant moyen que doit délivrer le pack de supercondensateurs pour des tensions de 160V et de 20% de cette valeur en considérant que la puissance fournie est de 120 kW.

Réponse : **750 A sous 160V et 3750 A sous 32 V**

4.4 Vérifier que le courant maximal demandé peut être supporté par le pack de supercondensateurs.

Réponse : **28 modules peuvent fournir $28 * 170 = 4760 A$ au maximum, c'est donc suffisant.**

4.5 Vu la masse autorisée pour le système de stockage d'énergie d'une F1, cette solution à base de supercondensateur convient-elle ?

Réponse : **28 modules pèsent $28 * 5,1 = 142,8 kg$, ce qui est bien trop lourd pour les 25 kg autorisés. Tant pis !**

FORMULAIRE 1

Relation courant-tension d'une bobine en complexe : $\underline{U_L} = jL\omega \underline{I}$

Relation entre la pulsation ω_s /fréquence F_s statorique d'une machine synchrone et sa vitesse de rotation Ω_s :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = \frac{2\pi F_s}{p} \quad (p : \text{nombre de paires de pôles})$$

