

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

Une feuille de notes personnelles recto-verso, une calculatrice et un dictionnaire sont autorisés.

0 – CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET DONNEES

Cet examen porte sur l'étude d'un véhicule léger, à quatre roues, pesant environ 700 kg avec ses passagers. Ses roues ont un rayon $R_{roue} = 28 \text{ cm}$. Celui-ci est fait pour le milieu urbain, avec une vitesse maximale de 50 km/h. Le schéma synoptique de sa chaîne d'entraînement électrique est représenté ci-dessous.

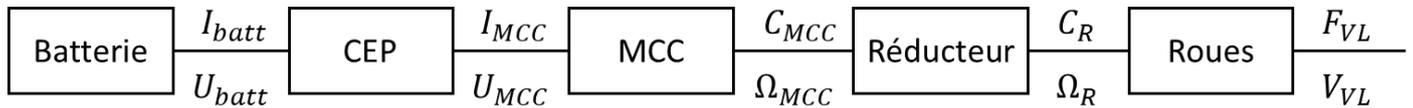


Figure 1 : schéma synoptique de l'entraînement électrique du véhicule étudié

Seuls deux points de fonctionnement P1 et P2 sont étudiés ici :

- P1 : $V_{VL} = 50 \text{ km/h}$ à vitesse constante, soit un effort nécessaire $F_{VL} = 143 \text{ N}$.
-
- P2 : $V_{VL} = 50 \text{ km/h}$, en fin d'accélération maximale, soit un effort nécessaire $F_{VL} = 674 \text{ N}$.

La machine électrique utilisée est une machine DC brushless **dont le fonctionnement est ramené à celui d'une machine à courant continu**. Quelques-unes de ses caractéristiques ont été reportées dans le Tableau 1.

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

| Plettenberg Predator 37/6 Evo | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------------------------|-------------|
| Puissance nominale P_{nom} | 5,3 kW | Puissance maximale P_{max} | 11,8 kW |
| Courant nominal I_{nom} | 120 A | Couple utile max $C_{u,max}$ | 19,6 N.m |
| Vitesse nominale N_{nom} | 6800 tr/min | Tension nominale U_{nom} | 50 V |
| Courant à vide I_0 | 10,8 A | Vitesse à vide N_0 | 7400 tr/min |
| Constante de couple k_C | 0,0677 N.m/A | Résistance équivalente R_{eq} | 40,8 mΩ |



1 – ÉTUDE DE LA MACHINE ELECTRIQUE (45 MIN)

1.1 Donner l'équation électrique et les 2 équations électromécaniques d'un moteur à courant continu liant les grandeurs mécaniques et électriques.

Réponse : $U = E + RI$; $C = k \cdot I$; $E = k \cdot \Omega$

1.2 En déduire l'expression de la droite de couple en fonction de la vitesse pour une tension donnée.

Réponse : $C = k \cdot U / R - k^2 / R \cdot \Omega$

Dans le but de tracer cette droite de couple à la **tension $U_{nom} = 50 \text{ V}$** , plusieurs points sont à calculer ci-dessous.

1.3 Donner la valeur du couple de démarrage (vitesse nulle).

Réponse : 83 Nm (couple de démarrage) $C = k \cdot U / R - k^2 / R \cdot \Omega$ ($\Omega = 0$)

1.4 Préciser à quoi sert le courant à vide I_0 ? Calculer le couple correspondant C_0 .

Réponse : Le courant à vide sert à vaincre les couples de frottement internes au moteur (frottements secs).

$C_0 = k_C I_0 = 0,73 \text{ Nm}$

1.5 Sachant que le couple électromagnétique sert à produire le couple utile et les éventuels couples de pertes, donner les couples nominaux électromagnétique et utile, puis les couples maximaux électromagnétique et utile.

Réponse : $C_{em,nom} = k \cdot I_{nom} = 8,12 \text{ Nm}$ (couple électromagnétique)

$C_{u,nom} = C_{em,nom} - C_o = 7,39 \text{ Nm}$ (couple utile)

Rmq : possible d'utiliser la puissance nominale divisée par la vitesse nominale, ce qui donne 7,44 Nm

$C_{u,max} = 19,6 \text{ Nm}$ (donné)

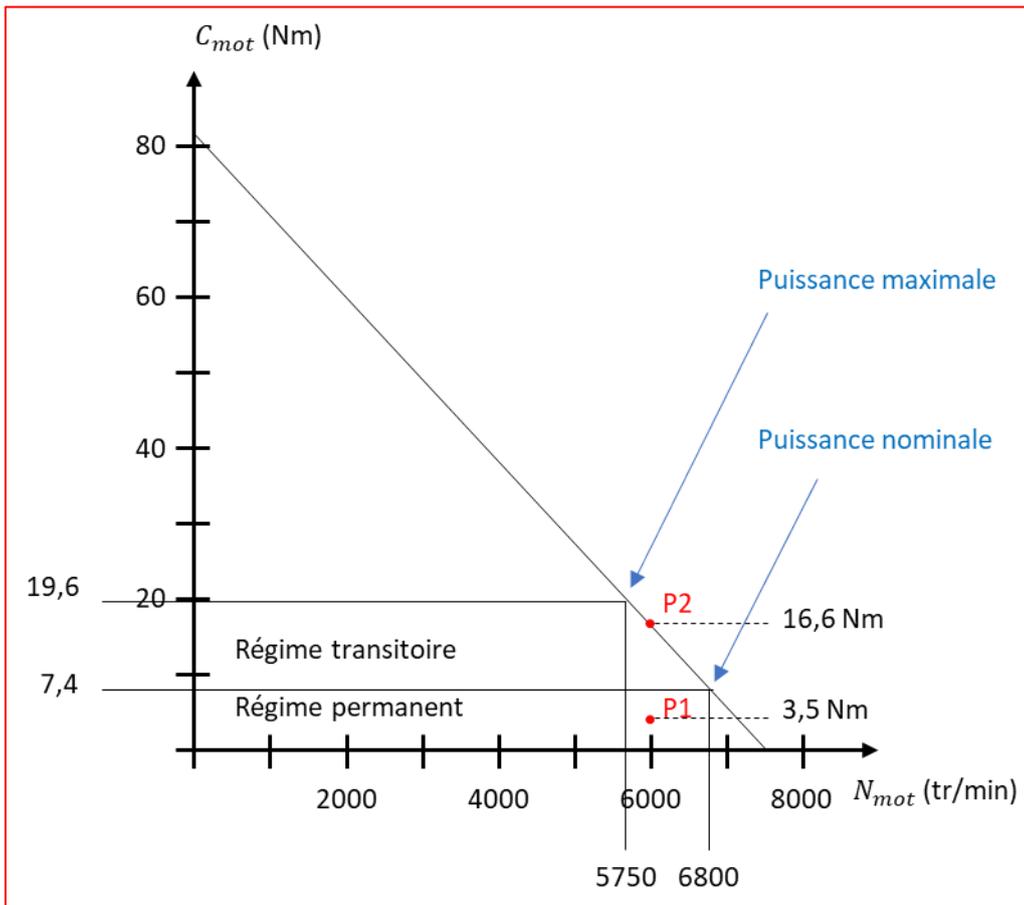
$C_{em,max} = C_{u,max} + C_o = 20,33 \text{ Nm}$

1.6 Donner le courant correspondant au couple électromagnétique maximal.

Réponse : $20,3/0,0677 = 300 \text{ A}$

1.7 Utiliser les résultats des questions précédentes pour tracer la droite de couple utile en fonction de la vitesse (en tr/min). Utiliser une échelle de 2 cm pour 10 N.m et de 2 cm pour 1000 tr/min. Placer les limites de couple utile (nominal et maximal) du moteur. Indiquer les zones de régimes permanent et transitoire.

Réponse : courbe



1.8 Utiliser votre graphe pour déterminer la vitesse au point de puissance maximale.

Réponse : graphiquement : 5750 tr/min

1.9 Donner les valeurs du rendement de la MCC aux points correspondants aux puissances nominale et maximale.

Réponse : au point nominal, cela donne $\frac{712 \times 7,39}{50 \times 120} = 88,3 \%$

Au point maximal, cela donne $\frac{601 \times 19,6}{50 \times 300} = 78,5 \%$

2 – ÉTUDE DE LA TRANSMISSION (15 MIN)

Le réducteur sélectionné est un réducteur à engrenages à 4 étages, de rapport de réduction $R_{red} = 12,65$ avec un rendement $\eta_{red} = 0,9$.

2.1 Vu l'ensemble de la transmission, calculer la vitesse de rotation du moteur lorsque le véhicule est à 50 km/h.

Réponse : $6000 \text{ tr/min} = 628 \text{ rd/s}$ ($\Omega_m = Red/R_{roue} \cdot V$)

2.2 Calculer les puissances à la roue aux deux points de fonctionnement P1 et P2 définis en introduction.

Réponse : $v=50 \text{ km/h}=13.9 \text{ m/s}$, $P_{50}=F_{ent} \cdot v=2 \text{ kW}$ et $P_{50ACC}=F_{ent} \cdot v=9.36 \text{ kW}$

2.3 Calculer les couples moteur correspondant aux deux points de fonctionnement P1 et P2, puis placer ces deux points de fonctionnement sur le graphe du couple moteur. La transmission convient-elle ?

Réponse : en passant par les puissances, on obtient les puissances correspondantes en divisant par le rendement du réducteur. Puis on en déduit le couple en divisant par la vitesse de 628 rd/s. Enfin, les points sont placés sur le graphe couple-vitesse.

$P=2,22 \text{ kW}$ et 628 rd/s $\Rightarrow C_{U_{50}}= 3,54 \text{ Nm}$

$P=10,4 \text{ kW}$ et 628 rd/s $\Rightarrow C_{U_{50ACC}}= 16,6 \text{ Nm}$

La transmission convient, puisqu'elle permet de ramener les points de fonctionnement dans l'espace de fonctionnement du moteur. Notamment, dans le régime permanent pour les 50 km/h à vitesse constante, et dans le régime transitoire pour les 50 km/h avec accélération.

3 – ÉTUDE DE L'ALIMENTATION DE LA MACHINE ELECTRIQUE (20 MIN)

3.1 Grâce aux résultats de la question 2.3, calculer le courant maximal que consommera le moteur.

Réponse : en P2, à 10,4 kW, $C_u= 16,6 \text{ Nm}$, $C_{em}=C_u+C_o=17,33 \text{ Nm} \Rightarrow I=C_{em}/k= 256 \text{ A}$

3.2 En déduire une limite maximale en courant des composants du CEP associé.

Réponse : Coeff de sécurité de 1,5 OU de 2

Soit : $I_{max \text{ CEP}}= 1,5 \cdot 256= 384 \text{ A}$ OU $I_{max \text{ CEP}}= 2 \cdot 256= 512 \text{ A}$

Il vous est maintenant demandé de dimensionner un pack batterie en respectant le cahier des charges suivant :

| | | | |
|------------------|-------|-------------------------------|--------|
| Tension nominale | 55 V | Puissance nominale (décharge) | 2,5 kW |
| Energie | 5 kWh | Puissance maximale (décharge) | 12 kW |

Pour cela, vous devez utiliser les cellules suivantes :

- Li-ion : LFP-graphite

- Masse : 1,2 kg

- Tension nominale : 3,2 V

- Capacité : 40 Ah

- Décharge : 1,5C (nom.), 3C (max)

3.3 Préciser le nombre de cellules à mettre en série et en parallèle pour répondre au cahier des charges. Détailler votre démarche et donner les caractéristiques du pack batterie ainsi formé : sa tension nominale, son énergie et ses puissances nominale et maximale.

Réponse : Critère en tension : il faut **18 cellules en série**, ce qui donne une **tension nominale de 57,6 V**.

Critère en puissance nominale (décharge) : il faudrait 1 cellule en //, soit une puissance nominale de 3456 W.

Critère en puissance maximale (décharge) : il faudrait 2 cellules en //, soit une puissance maximale de 13824 W.

Critère en énergie : il faudrait 3 cellules en //, soit une énergie de 6912 Wh.

\Rightarrow Conclusion : **il faut 3 cellules en // pour respecter tous les critères du cahier des charges.**

\Rightarrow Cela donne un pack batterie de 57,6 V, avec une énergie de 6,9 kWh, une puissance nominale de 10,4 kW et une puissance maximale de 20,7 kW.

3.4 Pour une demande de puissance de 2,5 kW en moyenne, quelle sera l'autonomie de ce pack batterie en heures ?

Réponse : le pack pourra fonctionner pendant $6900/2500 = 2,8 \text{ h} = 2\text{h}48$

4 – ÉTUDE DE LA RECUPERATION D'ÉNERGIE PAR LA TURBOLIENNE (20 MIN)

Un ami essaie de vous convaincre que l'ajout d'une éolienne au-dessus de votre véhicule vous permettra de gagner en autonomie, car vous récupéreriez ainsi de l'énergie en roulant. Rongé par le doute, vous décidez de mener votre propre étude. Dans un catalogue, vous trouvez une turbolienne de 1 m de diamètre, qui pourrait donc tenir sur votre véhicule.

Son schéma synoptique est représenté sur la Figure 2, avec la puissance fournie par l'air à droite, convertie en puissance mécanique par les hélices, puis en puissance électrique triphasée par la génératrice synchrone et en puissance électrique continue par le CEP, afin d'être branché sur la batterie.

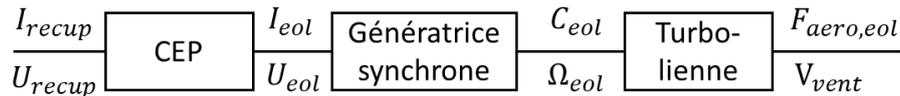


Figure 2 : schéma synoptique de la turbolienne et de son électronique de puissance

4.1 D'après la documentation de la turbolienne, celle-ci fournit 1,5 kW électrique pour un vent de 50 km/h. La tension qu'elle fournit à cette vitesse est de $U_{eol} = 60 V$ efficace, pour un facteur de puissance de 0,8. Rappeler la formule de la puissance en triphasé, puis déduisez-en le courant fourni I_{eol} par la génératrice synchrone.

Réponse : $P_{elec,eol} = \sqrt{3} U_{eol} I_{eol} \cos \varphi$, ce qui donne $I_{eol} = 18,0 A$

4.2 En supposant que le convertisseur de la génératrice synchrone a un rendement égal à 1 et en prenant $U_{recup} = U_{batt} = 55 V$, quel sera le courant récupéré I_{recup} ?

Réponse : la puissance électrique est toujours de 1,5 kW et la puissance électrique est alors en continu. Donc le courant vaudra $I_{recup} = \frac{1500}{U_{recup}} = 27,3 A$

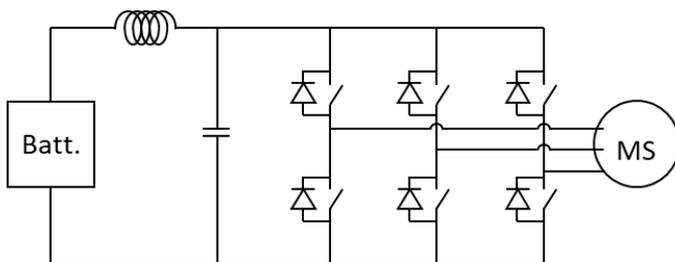
4.3 Donner le nom des éléments de convertisseur électronique de puissance qui permettraient de convertir la puissance électrique en sortie de la génératrice synchrone ($P_{elec,eol}$) vers celle la batterie (P_{recup}) ?

Réponse : option 1 : un redresseur à diodes triphasé, un filtre, puis un hacheur (2 quadrants suffisent)

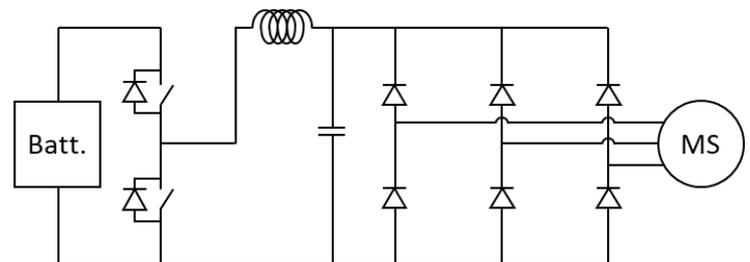
option 2 : un onduleur triphasé / redresseur commandé + filtre

4.4 Faites un schéma du convertisseur électronique de puissance que vous proposez, en indiquant où sont branchées la batterie et la génératrice synchrone.

Réponse :



Structure acceptée



Structure acceptée

5 – ÉTUDE DU VÉHICULE AVEC TURBOLIENNE (20 MIN)

L'ajout de la turbolienne sur le véhicule donne lieu à un nouveau schéma synoptique (Figure 3). Les points de fonctionnement du véhicule P1 et P2 ne changent pas. Ainsi, les grandeurs V_{VL} et F_{VL} définies dans l'étude précédente ont été reportées sur la Figure 3. Il est proposé de définir un nouvel effort $F'_{VL} = F_{VL} + F_{aero,eol}$ qui devra être fourni

par les roues. L'effort de traînée aérodynamique liée à la turbolienne vaut $F_{aero,eol} = 192 N$. Ce nouvel effort va entraîner des besoins supplémentaires dans la chaîne d'entraînement, d'où les nouvelles grandeurs : C_R' , C_{MCC}' , I_{MCC}' , I_{CEP}' et I_{batt}' .

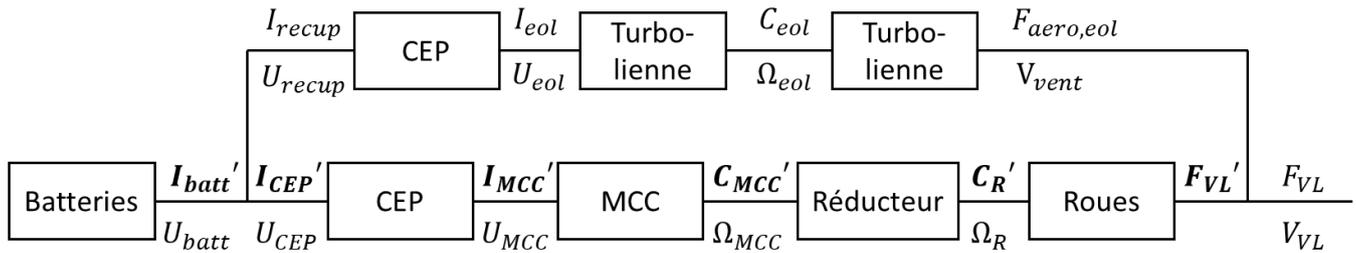


Figure 3 : schéma synoptique de l'entraînement électrique du véhicule étudié avec sa turbolienne

5.1 Pour le point de fonctionnement à vitesse constante P1, donner la force F_{VL}' et la puissance P_{VL}' correspondante.

Réponse : $F_{VL}' = 143 + 192 = 335 N$, soit une puissance $P_{VL}' = 4653 W$

5.2 Quel est le nouveau couple C_{MCC}' que doit fournir la machine à courant continu dans ces conditions ? La MCC travaillera-t-elle en régime transitoire ou permanent ? (se baser sur vos résultats sur la partie 1).

Réponse : $C_{MCC}' = \frac{P_{VL}'}{\Omega_{MCC} \times \eta_{red}} = \frac{4653}{628 \times 0,9} = 8,23 Nm$. Cela est supérieur au couple nominal de 7,39 Nm, donc la MCC sera en régime transitoire.

Pour les questions suivantes, on supposera que l'on a des rendements constants et « optimistes » de : **90% pour la machine à courant continu (MCC)** et de **100% pour le CEP entre la batterie et la MCC**.

5.3 Quelle serait la puissance électrique P_{MCC}' à fournir à la MCC pour le point P1 avec turbolienne ?

Réponse : $P_{MCC,elec}' = \frac{P_{VL}'}{\eta_{red} \times \eta_{MCC}} = \frac{4653}{0,9 \times 0,9} = 5744 W$

5.4 L'ajout de la force $F_{aero,eol}$ associée à la turbolienne représente une puissance supplémentaire à fournir pour maintenir le véhicule à 50 km/h. Donner les valeurs de la puissance supplémentaire associée à $F_{aero,eol}$ au niveau : des roues, en sortie de MCC (puissance mécanique) et en entrée de la MCC (puissance électrique).

Réponse : Au niveau des roues, cela représente $F_{aero,eol} \times V_{VL} = 2667 W$

En sortie de MCC, cela représente $2667/0,9 = 2963 W$

En entrée de MCC, cela représente $2963/0,9 = 3292 W$.

5.5 En comparant la puissance électrique récupérée par la turbolienne à 50 km/h et la puissance supplémentaire demandé en entrée de la MCC (associée à la force $F_{aero,eol}$), conclure sur l'intérêt de la récupération d'énergie par une turbolienne, lorsqu'elle est entraînée grâce au mouvement du véhicule.

Réponse : La turbolienne permet de récupérer 1,5 kW, alors qu'il faut fournir 3,29 kW de plus à la MCC pour vaincre la traînée aérodynamique issue de la turbolienne. C'est donc parfaitement idiot.