

Comparaison entre les karts thermique et électrique

Arnaud Sivert,

Keywords: go-kart, ecological vehicle, project based learning, power electronics, embedded electronics, sustainable development, battery, motors, charger, transmission.

1. Introduction

Pour réaliser un véhicule électrique, il faut faire un compromis entre la puissance, la consommation d'énergie, le poids, le volume, le prix et l'autonomie. Depuis 2006, un challenge national français de karting électrique, organisé par l'Association e-Kart (<http://www.e-kart.fr>), a lieu annuellement [1]. Une vingtaine d'équipes s'affrontent et montrent leurs nouvelles idées et réalisations. Nous allons voir dans ce papier, la puissance qui est demandée au moteur en fonction de la vitesse, le couple d'accélérateur pour démarrer rapidement, les différents types de moteurs, de variateurs, de batteries utilisées ainsi de chargeurs, et enfin l'instrumentation nécessaire à la mesure de ses grandeurs. Ces karts électriques n'ont aucune nuisance sonore et sont de plus en plus utilisés pour la location sur piste indoor. Depuis 2009, la plupart de ces karts rivalisent avec les karts thermiques. Mais quels sont les caractéristiques des karts thermiques de compétition et quelles sont les motorisations électriques équivalentes ?

2. Caractéristiques des karts thermiques.

Les karts thermiques ont des moteurs de 125 cm³ qui développe au maximum des puissances d'environ 22 kW sans boîte de vitesse, et jusqu'à 32 kW avec une boîte de vitesse. Les karts sont par définition des engins qui n'ont pas de suspension, ni de différentiel. Le diamètre des roues est imposé à 25cm (10 pouces). L'accélération est d'environ de 4.5s pour atteindre 50m et 6.5s pour 100m. Les moteurs tournent à 18 000 tr/mn ce qui entraîne un entretien et une usure importante du moteur. La masse d'un kart avec le pilote est d'environ 170 kg. Nous allons voir la puissance qu'il faut pour rouler en fonction de la vitesse.

3. Power in steady state speed

En régime établi de vitesse, la puissance résistive dépend du type de pneu, de la chaussé, de la pente, mais surtout des frottements de l'air :

$$F_{\text{resistive}}(\text{N}) = F_{\text{Road}} + F_p + F_A \quad (1)$$

$$F_p(\text{N}) = M(\text{kg}) \cdot g \cdot \text{slope}(\%) \quad \text{with } g=9.81 \quad (2)$$

$$F_A(\text{N}) = f_a \cdot [V(\text{Km/h}) + V_{\text{wind}}]^2 \quad (3)$$

La force de l'air est la principale force résistive. The power needed can be observed in a steady state speed on figure 1.

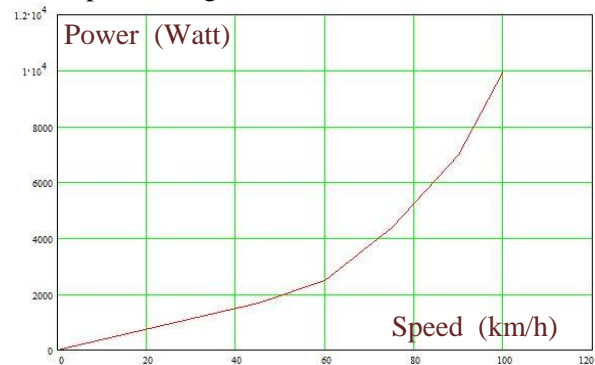


Figure 1: Motive power vs speed
[M=250kg, $f_a=0,583 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^2$]

Maintenant, nous allons voir quel doit être le couple accélérateur que doit avoir le kart.

4. Torque acceleration

Un kart électrique est plus lourd qu'un kart thermique. Sa mase avec pilote est de 250 kg. S'il doit atteindre une vitesse de 100 km/h en 4 s, le couple accélérateur du moteur devra être supérieur à la valeur donnée par l'équation suivante :

$$F_{\text{wheel}} = M \frac{dv}{dt} + F_{\text{Resistive}} = 1736\text{N} + F_{\text{Resistive}} \quad (4)$$

Le couple que devra avoir le moteur dépendra de la valeur de la réduction de vitesse donc du choix de la vitesse maximale. Il y a donc un compromis entre la vitesse maximale (6) et le couple accélérateur (4) que peut fournir l'ensemble moteur/variateur.

$$C_{\text{motor}} = (F_{\text{wheel}} \cdot \text{radius}) \cdot \text{Gear} \quad (5)$$

$$V_{\text{max}}(\text{m/s}) = N_{\text{max motor}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{Gear} / 60 \quad (6)$$

Le choix de la transmission fait que l'on privilégie soit l'accélération, soit la vitesse maximale. Nous allons voir comment optimiser le réducteur de vitesse.

5. Transmission

Les moteurs électriques ont en général une vitesse maximale d'environ 5000 tr/mn. Donc, il faut un réducteur entre le moteur et l'arbre de transmission qui adapte la vitesse du karting mais permet d'avoir un meilleur couple accélérateur. Des courroies crantées sont utilisées entre le moteur et l'arbre la transmission. Mais avec le niveau de couple accélérateur, la tension de la courroie crantée doit être importante pour qu'elle reste en prise avec les couronnes. Cette tension entraîne des pertes non négligeables. Comme alternative à la transmission par courroie, il est possible d'utiliser des transmissions par chaîne.

Tableau 1. Caractéristiques des moteurs en fonction du rapport de réduction,

U _{batt}	I _{limit} moteur	Réduction Gear	Inertia kg.m ²	V _{max} (km/h)	t(s) V=100km/h	t(s) 50m	I (A) ST battery
96V	200A*2	25/44	1.26	150	7.9	5.3	340A
96V	200A*2	17/44	0.58	100	5.4	4.4	100A

La réduction de vitesse pour atteindre une certaine distance en un minimum de temps est déterminée à partir de l'équation (7) suivante :

$$\text{Gear} = \left[\text{Dis tan ce} \cdot \frac{(\text{Torque}_{\text{moteur}} - \text{Torque}_{\text{load}})}{\text{N}^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{60}\right)^2 \cdot \text{radius}^3 \cdot \text{Mass}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Pour simplifier le calcul, Le couple de charge sera négligé par rapport au couple de démarrage. Pour un kart évoluant sur une piste indoor avec des lignes droites de 50 m au maximum, il faut une réduction de 13/44. Si l'on veut réellement optimiser la transmission en fonction d'une piste, il faut donc une boîte de vitesse.

Avec le tableau précédent et pour un réducteur de 17/44, on peut voir l'accélération et le régime établi du moteur sur la figure 2. Le couple de freinage est inférieure ou égale à ce que peut faire le moteur. Donc, ce type de freinage est relativement long, donc peu utilisé dans les freinages tardifs de pilotage.

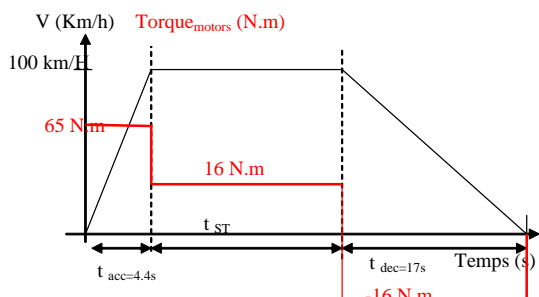


Fig 2 : Vitesse et couple demandés aux moteurs avec réducteur 17/44 sur banc de charge.

Tableau 2. Différent type de moteurs

Type de motor	Tension max	I _{nom} A	I _{max}	P _{mot} kW	Poids kg	Long*Ø & volume cm ³	Prix 2012	N _{max} Rpm	IP
DC avec balais	96V	145	400	14	11	11*20 => 690	1600€	4000	22

Sur le tableau suivant, un exemple est fourni pour deux types de poulies de transmission et avec un kart disposant de 2 moteurs dont le courant est limité à 200A par les variateurs. Les moteurs ont une constante de couple de 0.164 Nm/A. Ils fournissent un couple moteur maximal de 65 Nm.

Le tableau 1 donne la vitesse maximale, l'inertie ramenée sur l'arbre moteur, le temps pour atteindre 50m et 100 km/h, ainsi que le courant en régime établi.

En pratique, le frottement de l'air diminue légèrement le temps d'accélération.

En fonction du paramétrage de la limitation du courant et du nombre d'accélération, la température du moteur va s'élever.

Il faut donc déterminer le courant équivalent thermique du moteur pendant un cycle de fonctionnement (un tour de piste) à partir de l'équation suivante :

$$I_{\text{m equ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_n)^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} = \quad (8)$$

Le courant équivalent thermique doit être plus faible que le courant nominal du moteur

A cause des accélérations successives que la piste occasionne, le courant nominal peut être vite dépassé et détruire le moteur. D'ailleurs, les motorisations demandent d'une ventilation forcée qui consomme de 100W à 1000W.

Maintenant que la puissance demandée ainsi que le choix du réducteur est connu, nous allons voir les différents types de moto-variateurs

6. Types de motor and controller

3 types de moteurs sont utilisés comme on peut le voir sur le tableau 2 :

Brushless DC	48V	300	400	15	2	8.5*11 => 290	1300€	8000	22
Asynchrone	28V	150	300	10	20	30*18 => 1700	1500€	4500	55

Les moteurs DC sont associés à un hacheur qui limite le courant de démarrage. Ces moteurs et variateurs ont un encombrement réduit ce qui permet de mettre 2 moteurs sur le même arbre de transmission afin d'additionner le couple des 2 moteurs. Souvent 2 hacheurs sont utilisés qui permettent aux moteurs de fournir le même couple en réglant légèrement la consigne d'accélération.

On peut voir sur la courbe suivante la tension et le courant d'un kart électrique bi-moteur en fonction du temps.

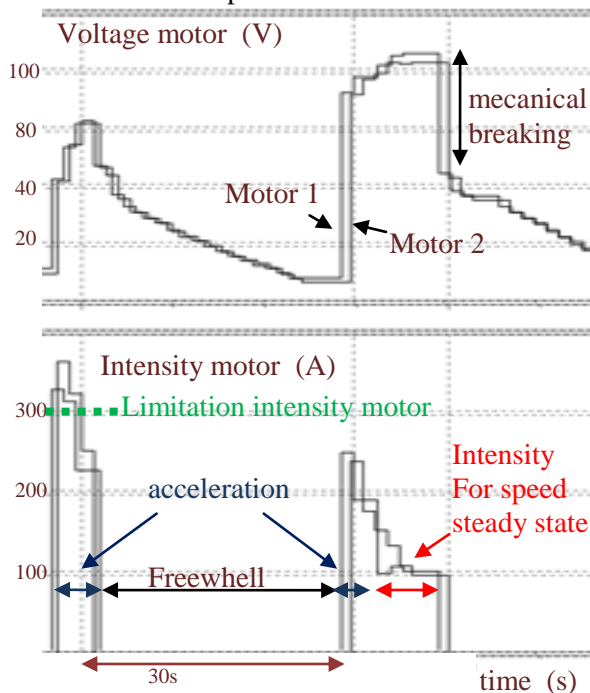


Fig 4 : Voltage et intensity for twin DC brush motors 28 kW nominal

Les deux moteurs absorbent approximativement les mêmes courants (voir la figure 4), indiquant que les variateurs sont bien réglés.

Les moteurs brushless sont des outrunner qui permettent d'avoir encore moins d'encombrement que le moteur DC, et pas d'entretien des balais. Pas contre, le variateur est un peu plus complexe que le hacheur. En effet, c'est un onduleur triphasé qui alimente les bobines en fonction du capteur de position du rotor. Des karts électriques bimoteurs ont été aussi réalisés en brushless.

Par contre, le moteur asynchrone et son variateur sont relativement encombrant et il est peu commode d'installer 2 moteurs. Le variateur du moteur asynchrone est une commande vectorielle pour avoir un maximum de couple au démarrage et retenir le véhicule à vitesse nulle sans utiliser

de frein à manque de courant. Le moteur asynchrone avec son indice de protection IP 55 est idéal pour la location de karting.

Tous les variateurs peuvent retourner l'énergie aux batteries. Mais il faut faire attention que les batteries puissent recevoir cette énergie sans être détruites. Nous allons maintenant voir les batteries couramment utilisées sur les karts électriques.

7. Batteries

La solution standard d'alimentation électrique d'un kart est d'utiliser 4 batteries au plomb. Avec une puissance de 10 kW, l'autonomie est d'environ 10 minutes. Les prototypes 2 moteurs qui demandent 54 kW au démarrage et seulement 10kW à 30kW en nominal sont passés de 48V à 72V puis aujourd'hui à 96V dans le but de limiter l'intensité demandée aux batteries.



Fig 5 : Karts électriques 2 moteurs 28 kW nominal 48V au plomb à gauche et LiFeYPO4 à droite 96V. Challenge National Vierzon e-Kart 2011.

Sur la figure 5, on peut observer 2 karts ayant la même motorisation bi-moteur mais avec 2 types de batteries différentes. Avec l'accumulateur lithium LiFeYPO4, le poids est divisé par 2 pour une autonomie multipliée par 4. Le kart électrique lithium a une autonomie d'environ 40 minutes.

Pour l'instant, aucun prototype n'est passé en 400V avec 100 éléments de 20 A.H à 5000€ qui permettrait d'utiliser des variateurs industriels, mais une étude est en cours [3]. Le principal inconvénient est que si un seul élément à des soucis, alors l'autonomie sera fortement dégradée. Le tableau 3 indique qu'un taux de décharge important provoque une augmentation du prix de la batterie et réduit la durée de vie de la batterie. On peut remarquer que 30% du prix

d'un karting correspond aux prix de l'accumulateur.

Tableau 3. Caractéristiques des batteries					
Type de battery 96V	Size & Volume dm ³	Mass kg	Price 2011	charge rate max	discharge rate max
Plomb 6S 20A.H 8S	60 dm ³	140 kg	1600 €	100 A=5C	400 A
Lipofer 90A.H 28S	220*145*61=40 dm ³	60 kg	2800 €	90A=1C	300A = 3C
Li-po 100A.H 25S	35 dm ³	55 kg	6000 €	100A=1C	500A = 5 C
Super capa 72 V 94F 30S	515*263*220=30 dm ³	25 kg	4500 €	800 A	800A

8. Chargeurs

Avec des taux de charges de 1C à 90 A, les chargeurs de batteries permettent de charger à 80% les batteries en 1 heure. Les chargeurs au plomb sont simples à réaliser, la tension de seuil doit être limitée à 14,4V pour les batteries plomb gel OPTIMA JAUNE pour minimiser le dégagement gazeux et le courant de charge doit être limité pour ne pas détruire la batterie [2]. Pour les accumulateurs lithium, le courant de charge doit aussi être saturé, mais il faut vérifier que la tension de seuil de chaque élément ne soit pas jamais dépassée. La gestion de ces tensions est réalisé par le circuit BMS (Battery Management Sytem). Le courant doit diminué pour que la tension de seuil des éléments ne soit pas dépassée jusqu'à ce que le courant soit nul. ~~Donc, il y a un élément qui est chargé à 100%, mais les autres éléments peuvent être fortement déséquilibrés.~~

La figure 6 montre la disparité entre les courants de charge ainsi que la tension de chaque élément en fonction du temps. Par conséquent, 1 element est chargé à la tension de seuil 3.7V (100%), et les autres elements sont desequilibrés.

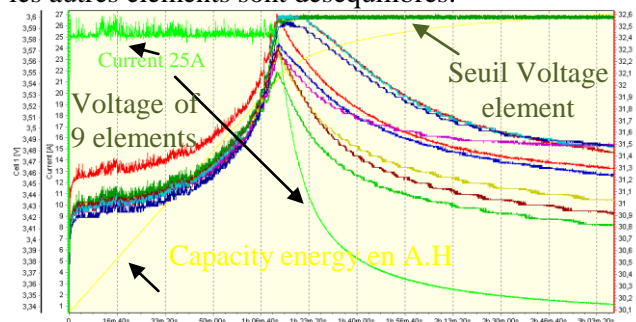


Fig 6 : battery charge of 9 elements li po fer.

Donc, il est préférable de charger les éléments de façon indépendante pour que tous les éléments soient chargés à 100%. Etant donné qu'il y a un grand nombre d'élément, il faut beaucoup de chargeur indépendant mais avec un courant de 1/10 du taux de charge. Cette solution coute relativement cher, donc de nombreux constructeurs proposent des équilibreurs avec résistance qui dévient le courant de charge des éléments les plus chargés.

Si les batteries lithium sont entièrement chargées, la régénération n'est pas possible car cela entrainerait la destruction des éléments.

~~— les prototypes utilisent souvent différentes tensions pour la signalisation, l'instrumentation donc déséquilibre les éléments d'où l'obligation de rééquilibrer~~

A partir du tableau 3, on peut voir que le taux de décharge des batteries est faible par rapport au courant qui peut supporter les moteurs. L'utilisation de super condensateurs peut être envisagé pour fournir le courant impulsionnel de démarrage.

9. Les super condensateurs

Tous les véhicules pendant les phases accélérations demandent de fortes puissances qui durent peu de temps. Or, la conversion électro chimique des batteries demande un certain temps de réaction pour fournir ce courant. Par contre, le stockage de l'énergie électrique dans les super condensateurs se fait sous forme électrostatique, au travers d'une accumulation de charges ioniques dans l'interface électrode/électrolyte. Ces super condensateurs ont une puissance massique très grande mais une énergie faible par rapport à des batteries comme on peut le voir sur le tableau 3. Par contre, les super condensateurs supportent un nombre de charge et de décharge 1000 fois plus grand qu'une batterie. La tension d'un super condensateur est faible de l'ordre de 2.7V et il faudra associer en série un grand nombre d'éléments pour alimenter un véhicule électrique. Il faut également gérer la charge, la décharge et l'équilibrage des super condensateurs. Les convertisseurs de puissance doivent limiter le courant sortant et rentrant des batteries et des super condensateurs. Ces convertisseurs doivent aussi surveiller et limiter la tension maximale de chaque élément de la batterie et des super condensateurs.

Une solution est que la batterie et les super condensateurs fournissent l'énergie à un bus continu DC par l'intermédiaire de deux hacheurs

réversibles en courant (Hacheur 1 et Hacheur 2 figure 5). Ce bus continu permet d'alimenter le variateur du moteur du véhicule. ~~Ce bus continu est donc juste une régulation de la tension.~~ Pour simplifier la commande des 2 hacheurs, le bus continu est une regulation de tension.

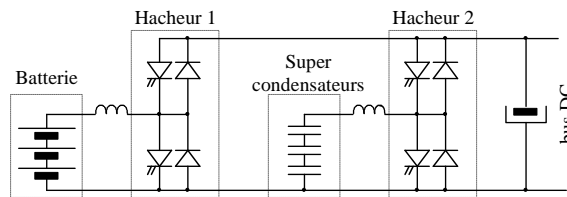


Figure 5 : Alimentation d'un bus continu par super condo et batterie

Ces deux convertisseurs ont pour rôle d'adapter les niveaux de tensions des éléments. De plus pour les super condensateurs, cela permet d'adapter la variation de la tension (V) inévitable liée à la variation d'énergie ΔW qui correspond à l'équation suivante :

$$\Delta W_{(Joule)} = \frac{1}{2} C_{SC} (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad (9)$$

Le principe de la commande des 2 hacheurs est de pouvoir maintenir constante la tension du bus DC qui alimentera le variateur réversible du véhicule.

S'il on veut extraire 90 % de l'énergie maximale stockée dans les supers condensateurs, il faut que :

$$V_{min} = \frac{1}{3} V_{max} \quad (10)$$

Pour dimensionner la valeur du super condensateur il faut connaître la puissance maximale que doit fournir le super condensateur. Dans le cas de la décharge à puissance constante du super condensateur :

$$P_{max} = V_{min} I_{SC_max} = F_{max} Vitesse_{max}$$

$$\Delta W = \frac{1}{2} C_{SC} \left(V_{max}^2 - \left(\frac{P_{max}}{I_{SC_max}} \right)^2 \right) \quad (11)$$

Donc, la puissance maximale conditionnera l'accélération.

Un bon compromis est une puissance maximale pratiquement identique à la puissance nominal des moteurs pendant une dizaine de seconde ce qui permet de doubler l'accélération. Donc, le courant fourni par les super condos se rapprochera de celle des batteries pendant l'accélération.

Toujours pour un karting bi-moteur qui peut accepter 600A au démarrage. Avec le super condensateur 67 W.H du tableau 3 pour une tension batterie de 72V, pour une puissance de 20kW donc un courant de 266A de décharge des

supers condos et de 291A pour les batteries, avec une tension mini de 24V, l'énergie utilisable sera de 60W.H et le temps de décharge sera de :

$$t(s) = \frac{3600 \cdot \Delta W_{(W.h)}}{V_{BusDC} \cdot I_{busDC}} = \frac{3600 \cdot 60}{72 \cdot 200} = 11 \text{ s}$$

En fin de décharge, le super condensateur devra fournir le courant donné par l'équation suivante :

$$I_{SC_max} = \frac{V_{BusDC} \cdot I_{busDC}}{V_{min}} = \frac{72 \cdot 266}{24} = 800A$$

Le volume et le prix des super condensateurs sont importants donc pour l'instant ce montage a été effectué seulement sur des véhicules plus petit (vélos électriques).

Mais la gestion des super condensateurs apporte quelques soucis sur le comportement du véhicule. En effet, le véhicule ne réagira pas pareil dans les 2 cas suivant :

- Si les super condensateurs sont vides alors il n'y aura moins d'accélération
- Si les super condensateurs sont pleins, le freinage électrique ne pourra se faire.

Si les batteries permettent de fournir et d'accepter plus de puissance dans un temps donné alors les super condos ne sont plus utiles. D'ailleurs ces dernières années, les constructeurs des batteries lithium proposent des éléments avec des taux de décharge à 15C.

De plus, il est possible de mettre 2 éléments de batterie en parallèle pour doubler le courant de sortie. Mais si un élément se met en court circuit, il entraîne la destruction de l'élément qui est en parallèle.

Maintenant que la motorisation et les batteries ont été étudiées, nous allons aborder l'instrumentation des kartings.

8. Instrumentation

L'instrumentation embarquée permet de vérifier le bon fonctionnement de ces prototypes ~~et de protéger les motos variateur et les batteries.~~ L'instrumentation permet de vérifier le paramétrage des variateurs en temps réel.

Les variateurs se protègent contre les échauffements par l'intermédiaire de la mesure du courant à partir de l'équation (8). Par contre, seul la mesure de température au niveau du moteur permet de le protéger car il est difficile de connaître le refroidissement des moteurs sur la piste.

La tension de chaque élément de batterie est mesurée en permanence ce qui permet de savoir si un élément est dégradé avec une résistance interne qui est plus élevée, ou une capacité énergétique qui ne correspond plus à celle prévue.

L'instrumentation fait l'intégration du courant fourni par la batterie pour connaître l'énergie

dépendée et pour la comparer avec l'énergie de la recharge.

Les informations par module hertzien sont fournies en temps réel dans les stands sur des PC et permet d'affiner les réglages des variateurs.

Conclusion

Les choix technique de ces prototypes se retrouvent sur tous les types de véhicules électriques. Il n'est pas facile de faire des choix technique pour un kart électrique car la place disponible est réduite. Une masse de 200 kg sans pilote est un objectif raisonnable et il faut faire de nombreux compromis.

Les prototypes sont souvent réalisés par des étudiants dans différentes IUT et écoles ingénieurs, mais également par des constructeurs de karts électriques qui vendent leurs matériels pour la location. Fiabiliser un prototype n'est pas chose facile pour des étudiants qui doivent aussi gérer un budget serré.

Le prix des kartings est entre 4000 euros à 8000 euros en fonction de technologies utilisées. Ce qui correspond aux prix d'un karting de compétitions.

Le prix de la consommation électrique est 5 fois plus faible que celui de l'essence.

References

[1] **Jean-paul Becar, Thierry Lequeu, Shane Colton** "An Electrical Go-Kart for Project Based Learning Platform" **EVER 2011**

[2] **Arnaud Sivert, Franck Betin, Jean-Paul Bécar** *A Fuzzy Logic Application for Go-Kart: a Battery Charger*

[3] **Eric Armando, Barbara Boazzo, Paolo Guglielmi**, *Bull-ET: an High Performance Electric Kart*, **EVER 2011**

[4] T. LEQUEU, B. BIDOGLIA, Y. DERRIEN, N. GODEFROY, "Two Examples of Pedagogical Applications of Electrical Go-Karts", EPE 2007, Aalborg, Denmark, September 2-5, 2007, 9 pages.

[5] Website of the French Association e-Kart www.e-kart.fr, visit on November 13th, 2011.

In 1994, he joined an Institute University of Technology in the Department of Electrical Engineering, as an Assistant Professor. His major research interest is the control of electrical machines I.U.T produces electric vehicles since 2008 and participates in the national challenge of electric kart e-kart.fr & kartelec.fr.

The go-kart as a teaching support is used in technical field activity as electrical engineering or mechanical engineering and also in theoretical field activity as physics and mathematics. The use of this teaching support is also adequate with the syllabus of undergraduate students and bachelor of technology students. The go-kart teaching tool turns all mechanical parameters such as forces and powers into their electrical analogy representation. The go-kart allows understanding some facts.

Thierry Lequeu was born in 1968 in Château du Loir, France. He received a high qualification for teaching at university level "Agrégation de Génie Electrique" in 1991 from the CACHAN Ecole Normale Supérieure and a PHD specialised in Electrical Engineering obtained at LYON Ecole Centrale in 1992. He obtained a Thesis in Electrical Engineering in 1996 at MARSEILLE University, specializing in the study of active power filter. He started to work at as Senior Lecturer at François Rabelais University of Tours. He is also in charge of the French Association e-Kart as President and organise every year since 2006 the National Challenge of Electrical go-kart. He is also responsible of electric and hybrid power converter for vehicle activity in the Microelectronics Power Laboratory of Tours, based on the collaboration with the company EOXO.

Arnaud sivert was born in France.

He received the Ph.D. degree from the University of Picardie Jules Verne, Soissons, France, in 2000.

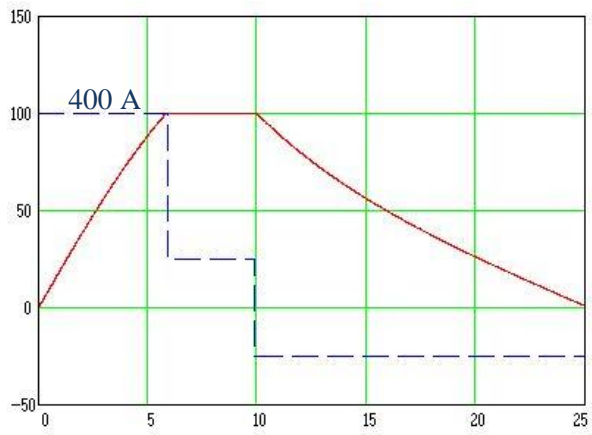


Fig 3 : vitesse et courant du moteur avec reducteur 17/44 simulé avec Fresistive.

