

SESSION 2017

**AGREGATION
CONCOURS EXTERNE**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
ET INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE**

**CONCEPTION PRÉLIMINAIRE D'UN SYSTÈME,
D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE ORGANISATION**

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	103	1268

Locomotive hybride

L'année 2015 a été marquée par la 21^{ème} Conférence des Parties sur les changements climatiques (COP 21), qui s'est déroulée à Paris. L'objectif majeur était de limiter l'augmentation de température moyenne de la planète, liée aux activités humaines, à moins de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle. Les deux principaux gaz à effet de serre (GES) retrouvés dans l'atmosphère sont la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (CO₂). Ce dernier a pour origine majoritaire la combustion de carburants fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel).

Le secteur des transports représente environ un quart des émissions de GES, avec le secteur routier comme principal contributeur. Pour une distance et une masse transportée équivalentes, le transport ferroviaire français génère 9 fois moins de CO₂ que le transport routier (source ADEME). Ce bon résultat est lié à l'effet de regroupement, qui se retrouve dans tout transport en commun, mais aussi à l'électrification du réseau ferroviaire. En effet, l'électricité française est majoritairement produite par les centrales nucléaires qui sont faiblement émettrices de GES. Or, sur plus de 50 000 km de réseau exploité, près de 16 000 km sont électrifiés. Cela représente seulement 31% du réseau, mais correspond à 90% du trafic passager et 85% du fret.

Mais le secteur ferroviaire n'exploite pas seulement des engins électriques. En effet, afin de pouvoir circuler sur la partie non-électrifiée du réseau et aussi afin d'avoir des engins autonomes de secours qui peuvent intervenir sur un tronçon qui a perdu son électrification, la SNCF continue à acheter et entretenir des locomotives Diesel-électriques.

Un des usages des locomotives Diesel est le triage ou la desserte locale dans des zones difficilement électrifiables comme les gares de triage ou les zones portuaires. Ces missions ont la particularité de présenter de faibles vitesses de déplacement, avec des phases d'attente importantes. Par conséquent, la puissance de traction nécessaire est faible (quelques centaines de kW), comparée aux engins utilisés pour le transport de fret ou de passager (quelques MW jusqu'à 9 MW pour un TGV). Par contre, même à l'arrêt, un certain nombre d'auxiliaires sont toujours à alimenter (puissance pouvant dépasser la centaine de kW). Ainsi, même à l'arrêt, le groupe Diesel doit rester en fonctionnement afin d'assurer cette alimentation électrique, ce qui constitue un mode de fonctionnement défavorable (consommation, pollution).

Afin d'améliorer son bilan carbone, la SNCF, comme d'autres utilisateurs ou fabricants d'engins ferroviaires, s'est intéressée à la propulsion hybride, déjà apparue dans le domaine automobile. Ainsi, elle a lancé à partir de 2007 le projet PLATHEE (PLAte-forme pour Trains Hybrides Économés en énergie et respectueux de l'Environnement) cofinancé par l'ADEME. Plusieurs partenaires ont participé au projet notamment les laboratoires LAPLACE et INRETS, les industriels Socofer, 2HEnergy, Soprano, Hélion, ERCTEEL et ALSTOM transport.

Ce projet visait à explorer diverses technologies à différents niveaux de la chaîne de conversion d'énergie. Par exemple, côté génération, en plus du groupe Diesel, la plateforme embarquait une pile à combustible et, côté stockage, des packs de batterie Nickel-Cadmium et de supercondensateurs. Mais il a également porté sur la gestion et l'efficacité énergétique ainsi que la conception optimisée. La locomotive est présentée à la figure 1.



Figure 1 – Locomotive Plathée avec les différents secteurs (violet : groupe Diesel, bleu : pile à combustible, vert : supercondensateurs, jaune : batterie NiCd)

La locomotive Plathée (numéro BB63413) était initialement une BB63400, engin de traction Diesel-électrique équipé d'un groupe électrogène de 610 kW de puissance nominale. L'étude des missions assurées par ce type d'engins a montré que le groupe Diesel tourne au ralenti 65% du temps contre 15% à son point de puissance nominale. Outre le fait que la consommation est élevée lors du ralenti, le moteur a tendance à s'encrasser, augmentant sa pollution. Par conséquent, le groupe Diesel est mal utilisé. D'où l'idée de l'hybridation du groupe électrogène avec des moyens de stockage qui fait l'objet de ce sujet.

L'architecture électrique étudiée sera celle de la figure 2. La partie de droite représente les équipements qui ont été conservés de la locomotive d'origine, tandis que la partie de gauche regroupe les éléments ajoutés (stockages électrochimique et supercapacitif) ou modifiés (groupe électrogène Diesel).

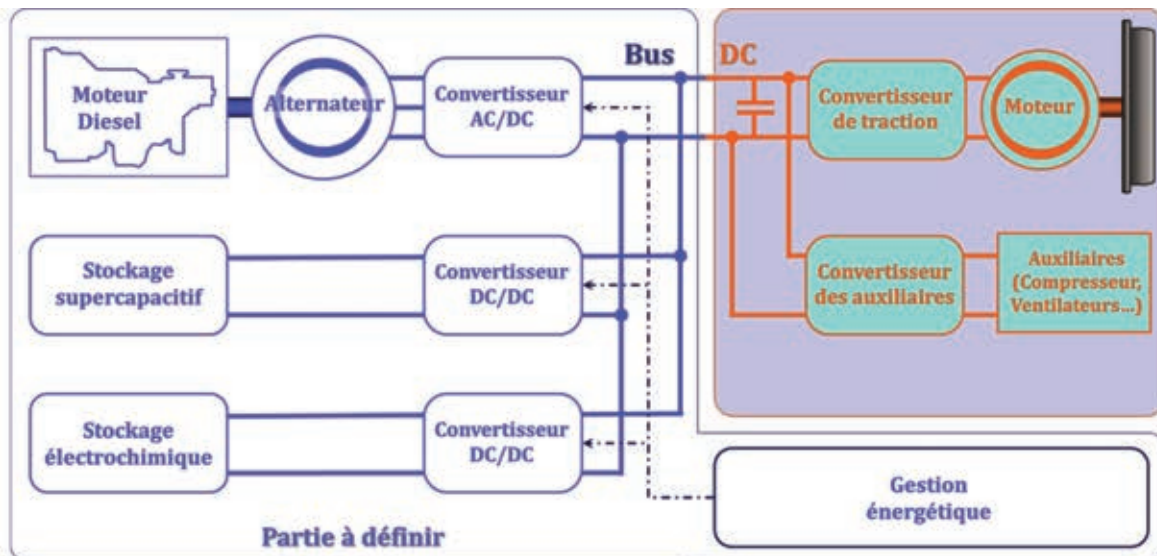


Figure 2 – Architecture fonctionnelle de la locomotive hybride

Le sujet est constitué de 4 parties indépendantes. Il est conseillé de traiter les parties dans l'ordre.

- Partie A¹ : étude et dimensionnement de la structure d'hybridation de la locomotive à partir des besoins énergétiques à couvrir (questions Q.1 à Q.10).
- Partie B¹ : étude et dimensionnement des éléments de stockage (questions Q.11 à Q.26).
- Partie C¹ : étude et dimensionnement du convertisseur statique d'hybridation (questions Q.27 à Q.51).
- Partie D² : utilisation d'une pile à combustible comme source primaire d'une locomotive hybride (questions Q.52 à Q.59).

Les notations utilisées lors de l'épreuve sont :

- lettre minuscule x : valeur électrique instantanée ;
- lettre majuscule soulignée \underline{X} : grandeur complexe (tension, courant, impédance) ;
- lettre majuscule X : valeur moyenne d'une grandeur continue ou valeur efficace d'une grandeur alternative ou module d'une grandeur complexe ($|\underline{X}|$) ;
- la notation \hat{x} est la valeur maximale de la variable x ;
- j est l'opérateur complexe ;
- p est la variable de Laplace.

¹ Cossi Rockys AKLI, *Conception systémique d'une locomotive hybride autonome*, 2008, thèse de doctorat réalisée au laboratoire Laplace avec un financement CIFRE SNCF.

² Olivier Rallières, *Modélisation et caractérisation de piles à combustible et Electrolyseurs PEM*, 2005, mémoire CNAM réalisé au laboratoire Laplace.

Partie A

L'objectif de cette partie est de valider le choix de l'hybridation ainsi que le dimensionnement des différents éléments de l'architecture.

Le type de locomotive étudiée a deux types de missions principales : la desserte locale (profil 1) et le triage (profil 2). Le dossier ressource donne le profil de consommation et la vitesse pour chaque mission aux figures R.1 et R.2. Les calculs qui suivent seront basés sur ces profils de mission ainsi qu'un profil simplifié (figure R.3).

Lors d'un fonctionnement hybridé, le groupe Diesel ne fournit que la valeur moyenne de la puissance consommée par les charges (P_{moy}).

Notations :

- $p_1(t)$ est la puissance instantanée du profil 1 et $p_2(t)$ est la puissance instantanée du profil 2 ;
- P_1 est la puissance moyenne du profil 1 et P_2 est la puissance moyenne du profil 2 ;
- $E_1(t_1, t_2)$ est l'énergie consommée sur le profil 1 entre les instants t_1 et t_2 et $E_2(t_1, t_2)$ est l'énergie consommée sur le profil 2 entre les instants t_1 et t_2 .

A.1. Dimensionnement des besoins énergétiques

La locomotive d'origine (BB63400) est équipée d'un groupe Diesel Sacm MgoV12Sh d'une puissance nominale de 610 kW.

Q.1. Sur une structure de locomotive non hybridée, quelle grandeur est utilisée pour dimensionner le groupe Diesel ? En s'appuyant sur les profils de mission fournis dans le document ressource (figures R.1 et R.2), justifier le choix du moteur Diesel de la BB63400.

Afin de quantifier le potentiel d'hybridation d'une mission, divers éléments doivent être déterminés : l'énergie totale, les puissances moyenne (P_{moy}) et maximale (P_{max}) et un paramètre nommé Potentiel d'Hybridation de Puissance (PHP). Ce dernier est défini par la relation suivante, à partir de la puissance maximale consommée sur le profil et de la puissance moyenne sur ce même profil

$$PHP = 1 - \frac{P_{moy}}{P_{max}}$$

Q.2. Compléter le tableau 1 du document réponse A des différentes données issues des trois profils de mission.

À partir de cette question, seuls les profils 1 et 2 (missions desserte locale et triage) seront considérés.

Q.3. À partir des valeurs déterminées dans la question précédente, déterminer la puissance du groupe Diesel minimale nécessaire afin d'assurer les deux profils de mission proposés si la locomotive est hybridée.

A.2. Calcul des consommations de carburant

Le groupe Diesel choisi pour Plathée est de la marque IVECO avec une puissance nominale de 215 kW électrique à 1 500 tr·min⁻¹ (modèle C78 TE2S). Il est supposé que pour une mission donnée, si le groupe Diesel est en fonctionnement, son point de fonctionnement est constant et égal à la puissance moyenne du profil de mission.

La consommation spécifique de carburant d'un moteur thermique est définie par la masse de carburant consommée par le moteur afin de produire une certaine énergie mécanique. Son unité est le g·(kW·h)⁻¹.

Q.4. À partir de la cartographie de consommation du groupe Diesel de 215 kW de puissance électrique (figure R.4 du document ressource), remplir le tableau 2 du document réponse A en supposant que le moteur tournera toujours à 1 500 tr·min⁻¹ quelle que soit la puissance délivrée.

Afin de pouvoir comparer les consommations des exemples hybridés (groupe de 215 kW) et non hybridés (groupe de 610 kW), et comme les technologies des groupes Diesel ont évolué en plus de 50 ans, l'hypothèse suivante est faite : les consommations spécifiques aux diverses puissances exprimées en pourcentage de la puissance nominale sont les mêmes pour les deux moteurs Diesel.

Q.5. Remplir le tableau 3 du document réponse A donnant les consommations spécifiques pour les différents niveaux de puissance du groupe Diesel de 610 kW.

Les durées d'occurrences des différents niveaux de puissance pour les deux profils de mission sont fournies dans le tableau R.1 du document ressource.

Donnée : masse volumique du gazole : $Mv = 850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Q.6. Expliciter comment déterminer la consommation en litres de gazole pour les deux profils de mission en mode non hybridé. Préciser les puissances auxquelles va fonctionner le groupe Diesel de 215 kW en mode hybridé pour les deux profils de mission. En déduire les consommations de gazole en litres. Préciser les différents résultats de consommation dans le tableau 4 du document réponse A.

Q.7. Calculer le gain de consommation obtenu grâce à l'hybridation et remplir la colonne correspondante du tableau 4 du document réponse A. Recouper ces résultats avec les PHP déterminés à la question Q.2. Conclure quant à l'intérêt de l'hybridation sur le groupe Diesel.

A.3. Choix des éléments de stockage

Afin de choisir les éléments de stockage qui seront montés dans la locomotive, le plan de Ragone présenté à la Figure R.5 du document ressource est utilisé.

Q.8. Expliquer ce qu'est le plan de Ragone et en quoi il peut être utile dans le cadre du choix des éléments de stockage à utiliser pour faire de l'hybridation.

Le choix retenu par le concepteur de la locomotive Plathée est d'associer au groupe Diesel deux stockages, un par accumulateurs NiCd et l'autre par supercondensateurs.

Q.9. Justifier le choix d'une double hybridation de la locomotive Plathée, soit l'association de deux technologies différentes d'éléments de stockage, accumulateurs NiCd et supercondensateurs. En particulier, expliquer le rôle respectif de chaque élément de stockage dans la gestion énergétique.

Q.10. Dans l'architecture hybridée de la figure 2, il y a maintenant 3 sources équivalentes connectées en parallèle, qui peuvent être pilotées soit en tension, soit en courant (groupe électrogène Diesel, accumulateurs NiCd et supercondensateurs). Donner et justifier la configuration (définir le caractère source de tension ou de courant pour chaque élément) choisie pour le pilotage des convertisseurs statiques des sources et éléments de stockage.

Partie B

Cette partie se concentre sur les deux éléments de stockage de la locomotive Plathée : batterie d'accumulateurs NiCd et supercondensateurs. L'objectif est de les dimensionner.

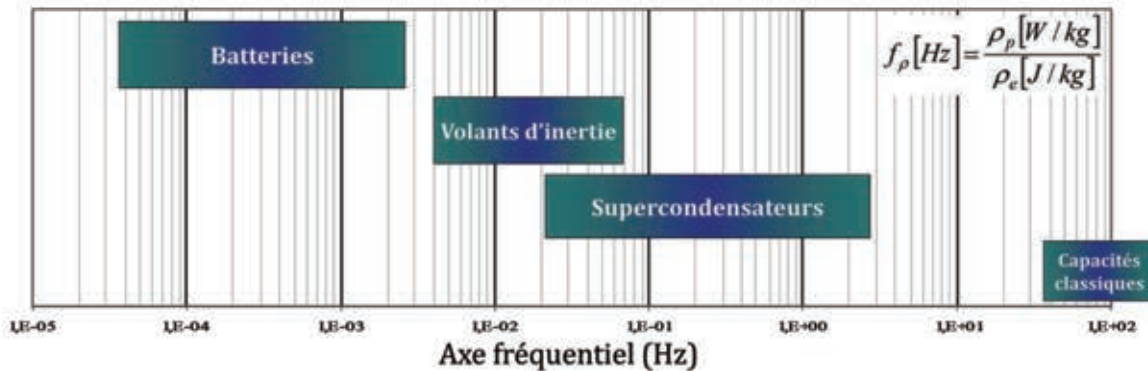
Afin de déterminer les contraintes appliquées à chaque élément de stockage et de les utiliser au mieux par rapport à leurs capacités, il est choisi de faire un partage fréquentiel de la fourniture d'énergie. Afin d'associer une plage de fréquences de fonctionnement à chaque élément de stockage, une projection sur l'axe fréquentiel du plan de Ragone est réalisée en calculant, pour chaque élément, la fréquence caractéristique définie comme

$$f_p = \frac{\rho_p}{\rho_e},$$

où :

- ρ_p définit la puissance massique de l'élément de stockage en $W \cdot kg^{-1}$;
- ρ_e définit l'énergie massique de l'élément de stockage en $J \cdot kg^{-1}$.

Le graphique obtenu est présenté à la figure 3.



Le filtrage fréquentiel est appliqué pour les deux profils types (desserte locale et triage). La puissance instantanée demandée aux supercondensateurs et à la batterie d'accumulateurs NiCd est tracée dans les figures R.6 et R.7 du dossier ressources. La convention retenue est la convention générateur (figure 4), soit une puissance instantanée positive lorsque l'élément de stockage fournit de la puissance.

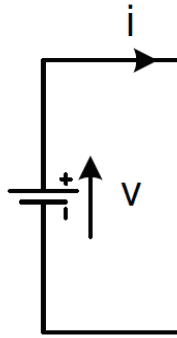


Figure 4 – Convention de signe des éléments de stockage

Sur les figures R.6 et R.7 du dossier ressources, se trouvent également les courbes de l'énergie. Elle est déterminée à partir de la puissance instantanée selon

$$E = -\int p(t) \cdot dt = -\int v(t) \cdot i(t) \cdot dt.$$

B.1. Dimensionnement du bloc de supercondensateurs

Notations :

- $|P_{SC}|_{max}$ est la puissance maximale en valeur absolue échangée par les supercondensateurs ;
- E_{uSC} est l'énergie utile de la contrainte appliquée aux supercondensateurs, définie par l'amplitude de variation de l'énergie stockée ;
- $f_{p,SC}$ est la fréquence caractéristique de la contrainte appliquée aux supercondensateurs. Elle s'exprime en hertz et est déterminée selon

$$f_{p,SC} = \frac{|P_{SC}|_{max}}{E_{uSC}}.$$

Q.11. Pour les deux profils types (desserte locale et triage), déterminer la puissance maximale échangée par les supercondensateurs, leur énergie utile et la fréquence caractéristique de la mission. Reporter les valeurs dans le tableau 5 du document réponse B.

Il est impossible d'utiliser 100% de l'énergie stockée dans un supercondensateur car cela correspond à une variation de 0 à la valeur maximale de la tension à ses bornes. En pratique, il est préférable de limiter la variation de tension entre 50% et 100% de la valeur maximale admissible par le supercondensateur.

Q.12. En admettant l'hypothèse précédente (utilisation du supercondensateur entre 50% et 100% de sa tension maximale), déterminer l'excursion en énergie utilisable pour un condensateur dont l'énergie stockée maximale est 1 kJ. En déduire, le minimum d'énergie totale à stocker afin de remplir les deux profils types.

Le supercondensateur utilisé dans la locomotive Plathée est le B49410B2506Q000 de la société EPCOS. Les données du constructeur sont fournies dans le dossier ressources à la figure R.8.

Q.13. À partir des données du constructeur (figure R.8 du dossier ressources), calculer le nombre minimal de supercondensateurs à monter dans la locomotive afin de fournir l'énergie totale minimale déterminée à la question Q.12.

Le choix a été fait de monter 1 600 éléments de supercondensateurs sur la locomotive Plathée. Par ailleurs, la tension du bus de l'architecture électrique étant fixée à 540 V, il a été fait le choix d'associer les supercondensateurs afin de créer un bloc qui admet 500 V comme tension maximale admissible.

Q.14. Déterminer le nombre d'éléments de supercondensateurs à connecter en série $n_{s,SC}$ afin de respecter la tension maximale de 500 V et le nombre de blocs ainsi formés à mettre en parallèle $n_{p,SC}$.

La figure 5 présente un modèle circuit équivalent de l'assemblage des supercondensateurs déterminé précédemment.

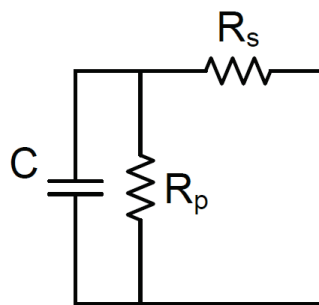


Figure 5 – Modèle équivalent de l'assemblage des supercondensateurs

Q.15. Expliquer pourquoi la résistance représentant l'autodécharge (R_p) peut être négligée sans impact sur le dimensionnement énergétique réalisé. Déterminer les valeurs de C et R_s de l'assemblage des supercondensateurs.

B.2. Problème de l'équilibrage des tensions du bloc de supercondensateurs

Le bloc de supercondensateurs est constitué de $n_{s,SC}$ éléments supercapacitifs connectés en série. Dans cette partie, l'étude est limitée à deux éléments en série, pour lesquels les pertes résistives sont négligées. En tenant compte des dispersions sur les composants, les deux valeurs de capacité ne sont pas identiques. Elles seront notées C_1 et C_2 et leurs valeurs respectives seront $C_1 = 5\,500\text{ F}$ et $C_2 = 4\,500\text{ F}$. Les tensions aux bornes des condensateurs seront respectivement v_{C1} et v_{C2} .

Q.16. Les condensateurs sont chargés à courant constant de valeur 100 A, à partir d'un état de charge nul. Déterminer les équations d'évolution des tensions aux bornes de chaque condensateur.

La charge est arrêtée lorsqu'un des deux condensateurs a atteint la tension nominale.

Q.17. Déterminer la durée de charge ainsi que les valeurs atteintes pour les deux tensions aux bornes des condensateurs. En déduire l'énergie stockée dans les deux condensateurs. Si la charge était poursuivie, quel serait le risque ?

La méthode classiquement utilisée pour assurer un équilibrage des tensions de deux condensateurs connectés en série est l'utilisation de résistances en parallèle. La figure 6 présente le circuit d'équilibrage passif avec résistance. Les deux résistances ont la même valeur.

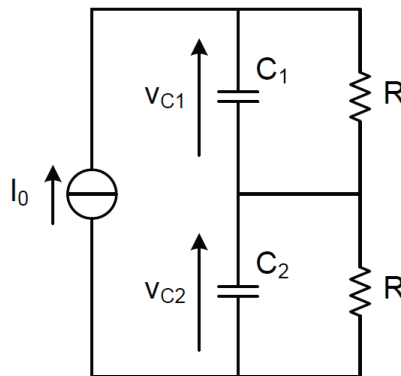


Figure 6 – Schéma avec circuit d'équilibrage passif

Q.18. Donner l'expression temporelle des évolutions des tensions aux bornes des condensateurs v_{C1} et v_{C2} lors de la phase de charge. Quelle valeur de résistance R permet d'assurer un équilibrage, soit une charge des deux condensateurs à la valeur maximale admissible. Est-ce que la valeur de résistance déterminée est acceptable d'un point de vue fonctionnement sur un profil à long terme ?

Q.19. La résistance d'équilibrage est fixée à 50Ω . Après avoir arrêté la phase de charge, comment évoluent les deux tensions aux bornes des condensateurs ? Sont-elles équilibrées ? Conclure quant à l'efficacité de ce système d'équilibrage passif.

Une autre solution d'équilibrage existe : elle consiste à ne connecter les résistances que lorsque cela est nécessaire par l'utilisation d'interrupteurs. La figure 7 présente la solution. Par exemple, lors d'une charge, lorsqu'un condensateur a atteint sa tension maximale alors que d'autres éléments ne l'ont pas encore atteinte, l'interrupteur correspondant au condensateur chargé est activé, connectant la résistance correspondante. Cela permet de continuer à charger les autres condensateurs, tout en protégeant l'élément ayant atteint sa tension maximale.

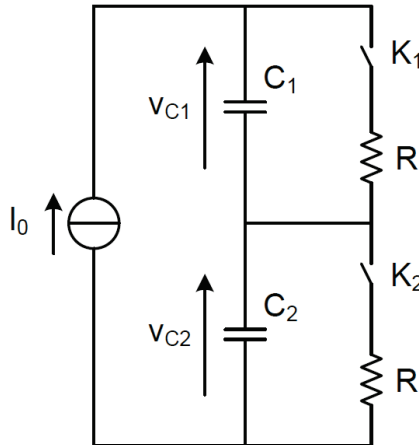


Figure 7 – Schéma avec circuit d'équilibrage à résistances commandées

Q.20. En supposant que les éléments sont chargés à 100 A, déterminer la valeur de la résistance R afin de pouvoir utiliser la méthode expliquée en préambule.

Lorsque tous les condensateurs ont atteint leur tension maximale, la phase de charge est stoppée et toutes les résistances d'équilibrage sont déconnectées par ouverture des interrupteurs.

Q.21. Déterminer les équations de l'évolution des deux tensions v_{C1} et v_{C2} lors d'une phase de charge de 100 A, les éléments étant initialement déchargés, jusqu'à ce que les deux éléments soient complètement chargés. Tracer l'évolution des deux tensions v_{C1} et v_{C2} .

Q.22. À la fin de la charge complète, déterminer l'énergie stockée dans l'ensemble ainsi que celle dissipée dans les résistances d'équilibrage. Comparer avec la valeur de l'énergie stockée obtenue sans système d'équilibrage (question Q.17). Conclure quant à l'efficacité de ce système d'équilibrage.

B.3. Dimensionnement du bloc de batterie d'accumulateurs NiCd

Notations :

- $|P_{Bat}|_{max}$ est la puissance maximale en valeur absolue échangée par les batteries d'accumulateurs NiCd ;
- Eu_{Bat} est l'énergie utile de la contrainte appliquée aux batteries d'accumulateurs NiCd, définie par l'amplitude de variation de l'énergie stockée ;
- $f_{p,Bat}$ est la fréquence caractéristique de la contrainte appliquée aux batteries d'accumulateurs NiCd. Elle s'exprime en hertz et est déterminée selon

$$f_{p,Bat} = \frac{|P_{Bat}|_{max}}{Eu_{Bat}}.$$

Q.23. Pour les deux profils types (desserte locale et triage), déterminer la puissance maximale échangée par le bloc de batterie, son énergie utile et la fréquence caractéristique de la mission. Reporter les valeurs dans le tableau 6 du document réponse B.

Le bloc batterie est composé de 576 éléments élémentaires FNC 1502 HR de Hoppecke dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- *capacité nominale : 135 A·h ;*
- *tension nominale : 1,2 V ;*
- *profondeur de décharge maximale acceptée en fonctionnement nominal de 50%.*

Q.24. À partir de la question précédente, déduire l'énergie stockée minimale nécessaire en tenant compte de la limite de décharge à 50% afin de remplir les deux missions types. À partir des données de la locomotive Plathée, montrer que le bloc installé est suffisant pour remplir les deux missions types.

Lorsqu'une batterie cycle, elle vieillit. Selon la technologie, le nombre de cycles possibles en fonction de la profondeur de cyclage avant remplacement est variable. La figure R.9 du dossier ressources donne la caractéristique classique pour une batterie NiCd permettant de déterminer le nombre de cycles limite.

Q.25. Pour les deux profils types proposés, déterminer la profondeur du cycle d'utilisation du bloc de batterie et le nombre de cycles autorisés pour chaque cas. Conclure quant à ce nombre de cycles sachant qu'un engin de traction est développé pour être utilisé de 30 à 50 années et que dans une journée, chaque cycle est répété dix fois. Reporter les valeurs dans le tableau 7 du document réponse B.

B.4. Adéquation du dimensionnement aux profils types

Q.26. En s'aidant des fréquences caractéristiques déterminées pour les supercondensateurs et la batterie d'accumulateurs NiCd pour les deux profils types, conclure quant au bon dimensionnement ou non des éléments de la locomotive Plathée et sur le choix de double hybridation qui a été fait.

Partie C

L'objectif est de définir les convertisseurs statiques qui vont être utilisés pour connecter les éléments de stockage au bus continu. Le choix a été fait de ne développer qu'une seule brique de conversion qui sera dupliquée afin de connecter les différents blocs (deux blocs de batterie d'accumulateurs NiCd et huit blocs de supercondensateurs).

Le cahier des charges le plus exigeant est celui du convertisseur alimentant un bloc de batteries d'accumulateurs NiCd. C'est donc celui-ci qui servira de support pour l'étude. Les éléments principaux sont résumés ici :

- tension du bus continu $E_{bus} = 540 \text{ V}$;
- bloc de batteries : 288 éléments connectés en série de 1,2 V chacun ;
- la puissance maximale est obtenue en décharge : $P_{max} = 380 \text{ kW}$ pour les deux packs batterie ;
- fréquence de découpage des interrupteurs : F_{dec} ;
- fréquence apparente de sortie (fréquence du courant de batterie) : F_{app} .

C.1. Architecture du convertisseur statique

Q.27. Définir le caractère source de tension ou de courant des deux sources connectées de part et d'autre du convertisseur statique (bus et batterie d'accumulateurs NiCd). En déduire et dessiner la structure du convertisseur statique en représentant les interrupteurs statiques sous la forme d'interrupteurs idéaux et en dessinant les éléments réactifs éventuels (bobine, condensateur).

Q.28. Pour chaque source, préciser le caractère unidirectionnelle ou bidirectionnelle en courant et en tension afin d'assurer tous les modes de fonctionnement nécessaires du convertisseur statique.

La convention retenue pour l'étude des interrupteurs statiques est la convention récepteur. La figure 8 présente les différentes grandeurs et noms retenus pour une cellule de commutation élémentaire à deux interrupteurs.

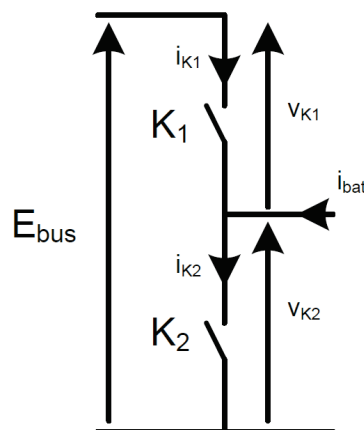


Figure 8 – Conventions de signe dans la cellule de commutation

Q.29. Tracer sur le document réponse C les segments utilisés par chaque interrupteur statique lors des différents modes de fonctionnement du convertisseur statique. En déduire les éléments utilisés physiquement pour réaliser ces interrupteurs à partir d'un ou de l'association de plusieurs composants semiconducteurs de base (transistor, diode, thyristor, ...).

Q.30. Dessiner le convertisseur statique synthétisé en y mettant tous les éléments physiques (composants semiconducteurs et réactifs).

Les interrupteurs K_1 et K_2 sont commandés de manière complémentaire à la fréquence de découpage F_{dec} avec une modulation de largeur d'impulsion (MLI). L'interrupteur supérieur (K_1) est passant quand le signal modulant v_{mod} est plus élevé que le signal de porteuse v_{tri} . Pour l'interrupteur inférieur (K_2), la commande est inversée.

La période de découpage est appelée T_{dec} et vaut $T_{dec} = 1/F_{dec}$. Le rapport cyclique α est défini comme le pourcentage de temps de conduction de l'interrupteur K_1 . Ce dernier est donc conducteur pendant αT_{dec} , tandis que l'interrupteur K_2 sera passant pendant $(1-\alpha)T_{dec}$.

Q.31. Calculer la tension d'un bloc de batteries, la tension de chaque élément étant supposée constante. En déduire la valeur du rapport cyclique α auquel va fonctionner le convertisseur statique.

Il y a deux blocs de batterie, chacun connecté au bus continu par un convertisseur. Le point de fonctionnement retenu est lorsque les deux blocs de batteries fournissent un total de 380 kW.

Q.32. Calculer le courant fourni par un bloc de batterie I_{bat} . Expliquer dans quel sens circule le courant dans les interrupteurs K_1 et K_2 à ce point de fonctionnement sur une période de découpage. Préciser pour chaque interrupteur, à quel composant semiconducteur cela correspond-il.

Le composant semiconducteur qui a été choisi est un module de chez Infineon qui intègre deux IGBT et deux diodes : FF450R12ME3. Afin de déterminer les pertes par conduction, il faut considérer un modèle circuit de chaque composant. Dans les deux cas, il sera constitué d'une source de tension en série avec une résistance, soit

$$\begin{aligned}V_{IGBT} &= V_{CE0} + r_{IGBT} \cdot i_{IGBT} \\v_d &= V_{d0} + r_d \cdot i_d\end{aligned}$$

Les données du constructeur sont fournies à la figure R.10 du dossier ressources. La température de jonction sera supposée égale à 125°C et la commande de grille se fait sous 15 V.

Q.33. Déterminer les éléments des modèles circuits de l'IGBT et de la diode. À l'aide des valeurs des courants fournies dans le tableau 8 du document réponse C, calculer les pertes par conduction pour chaque composant et reporter les résultats dans le tableau 8 du document réponse C.

Le calcul des pertes par commutation sera basé sur les courbes d'énergie de commutation de la figure R.10 du dossier ressources. Ces énergies de commutation sont supposées proportionnelles à la tension commutée.

Q.34. Déterminer les pertes par commutation pour les divers composants en tenant compte des données du tableau 8 du document réponse C et en fonction de la fréquence de découpage F_{dec} .

Afin de fixer la fréquence de découpage des interrupteurs, il faut mener une étude thermique des composants. Le composant est posé sur un dissipateur qui maintient la température de semelle à $T_c = 60$ °C. Les résistances thermiques entre les jonctions du transistor et de la diode et la semelle ont pour valeurs respectives $R_{thT} = 0,08$ K·W⁻¹ et $R_{thd} = 0,10$ K·W⁻¹.

Q.35. Exprimer la température de jonction pour l'IGBT et la diode, en fonction de la température de la semelle et des pertes. Après avoir précisé la température de jonction admissible en fonctionnement de commutation pour l'IGBT et la diode, calculer pour chaque, la fréquence de découpage maximale admissible permettant de respecter la température de jonction maximale admissible. En déduire, la fréquence qui sera utilisée pour le fonctionnement du convertisseur et les pertes par commutation pour chaque composant (compléter le tableau 8 du document réponse C).

L'ondulation du courant dans la batterie a été fixée à $\Delta I_L = 34,6$ A.

Q.36. Déterminer l'expression de l'ondulation de courant dans l'inductance ΔI_L en fonction de E_{bus} , α , L et F_{dec} . En déduire la valeur de l'inductance L . Commenter ce résultat ainsi que celui de la fréquence de découpage.

Q.37. En vous aidant de la figure R.11 du dossier ressources, proposer et justifier une évolution de la structure permettant de répondre aux commentaires issus de la question Q.36.

C.2. Etude du hacheur implanté dans la locomotive Plathée

Dans la locomotive Plathée, le convertisseur qui a été monté est un hacheur entrelacé avec 3 bras. Il est représenté à la figure 9 et le point de fonctionnement est toujours le même. Côté pilotage, chaque bras a toujours ses interrupteurs pilotés de manière complémentaire, la MLI définissant la commande de l'interrupteur supérieur. Le signal modulant (v_{mod}) est le même pour les trois bras, tandis que les porteuses (v_{tri1} , v_{tri2} et v_{tri3}) sont déphasés d'un tiers de période de découpage les unes par rapport aux autres.

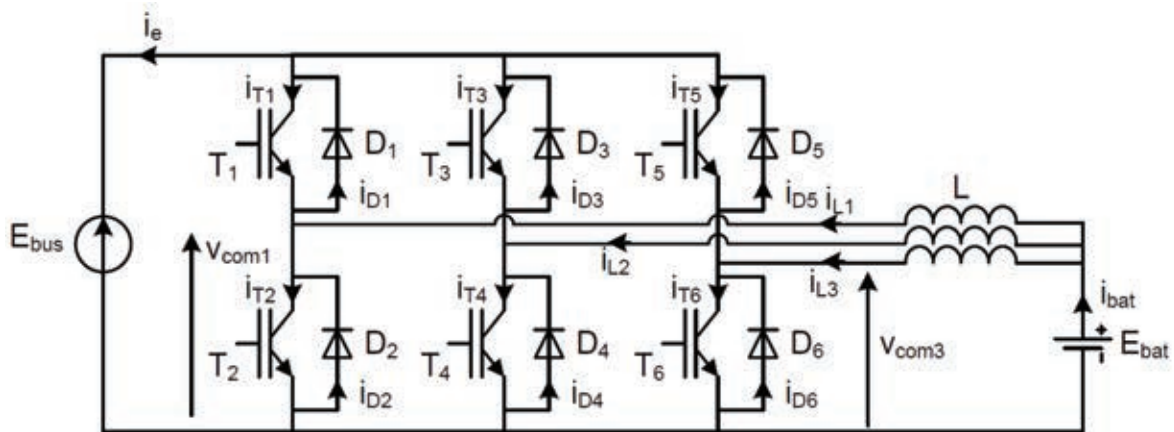


Figure 9 – Hacheur 3 bras

Q.38. Tracer sur le document réponse C l'évolution des tensions en sortie des trois cellules de commutation $v_{com1}(t)$, $v_{com2}(t)$ et $v_{com3}(t)$ en fonction des grandeurs de la MLI.

Les inductances de lissage ont toutes la valeur de $600 \mu\text{H}$. Par ailleurs, la fréquence désirée pour le courant circulant dans la batterie est $F_{app} = 6 \text{ kHz}$.

Q.39. Représenter le courant circulant dans la batterie $i_{bat}(t)$ sur le document réponse C. Préciser la valeur de la fréquence de découpage F_{dec} afin d'avoir la valeur de la fréquence apparente de sortie désirée. Déterminer également l'expression et la valeur de l'ondulation de courant ΔI_L dans une phase.

Q.40. Représenter les courants circulant dans les deux transistors (T_1 et T_2) et les deux diodes (D_1 et D_2) sur le document réponse C. Les valeurs extrêmes devront être précisées sur la figure.

Q.41. Montrer que les courants moyens et efficaces dans les éléments D_1 et T_2 peuvent s'écrire selon

$$\begin{aligned} \langle i_{D1} \rangle &= \alpha \cdot \left(I_{Lmax} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) = \alpha \cdot \langle i_L \rangle \\ I_{D1eff} &= \sqrt{\alpha \cdot \sqrt{I_{Lmax}^2 + \frac{\Delta I_L^2}{3}} - I_{Lmax} \cdot \Delta I_L} \\ \langle i_{T2} \rangle &= (1 - \alpha) \cdot \left(I_{Lmax} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) = (1 - \alpha) \cdot \langle i_L \rangle \\ I_{T2eff} &= \sqrt{1 - \alpha \cdot \sqrt{I_{Lmax}^2 + \frac{\Delta I_L^2}{3}} - I_{Lmax} \cdot \Delta I_L} \end{aligned}$$

Q.42. Déterminer les contraintes, ainsi que les pertes par conduction et commutation pour les quatre composants du premier bras de hacheur. Reporter les résultats dans le tableau 9 du document réponse C.

Q.43. Calculer les températures de jonction atteintes pour l'IGBT et la diode si la température de semelle est $T_c = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Comparer aux valeurs de la question Q.35 et commenter ce résultat.

C.3. Dimensionnement du filtre d'entrée du convertisseur

Le courant d'entrée i_e du convertisseur statique possède des harmoniques de découpage qui vont se propager sur le bus continu et dégrader la qualité de la tension. Afin de limiter ce phénomène, chaque convertisseur est équipé d'un filtre d'entrée, dont le schéma est représenté à la figure 10. Il est équipé d'une cellule L_f - C_f et la présence de la résistance R_f modélise les pertes dans la bobine ainsi que l'impédance interne de la source de tension E_{bus} . Sa valeur est fixée à $R_f = 2 \text{ m}\Omega$. Les pertes du convertisseur statique sont négligées dans cette partie.

Le filtre est dimensionné en mode de charge (batterie qui reçoit de la puissance), car c'est le mode qui peut amener l'instabilité du filtre. Les courants représentés sur la figure 10 sont donc positifs.

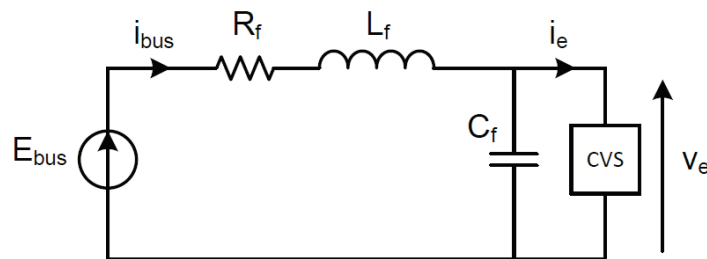


Figure 10 – Schéma du filtre d'entrée

Q.44. Montrer que l'étude de la propagation des harmoniques de courant générés par le convertisseur statique peut se faire à travers le schéma de la figure 11 où i_{eh} représente la source des harmoniques et i_{bush} est le courant harmonique résiduel qui revient sur le bus continu.

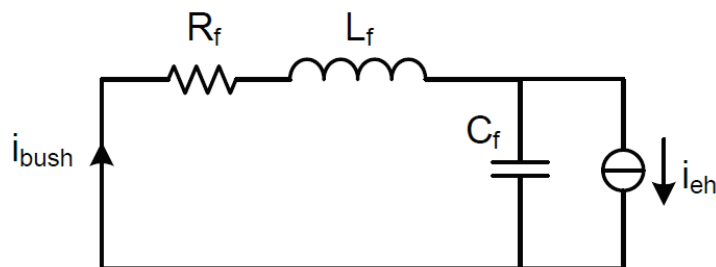


Figure 11 – Modèle harmonique du filtre d'entrée

Q.45. Exprimer la fonction de transfert $\frac{I_{bush}(p)}{I_{eh}(p)}$. En déduire la fréquence propre du filtre f_0 en fonction de L_f et C_f .

La fréquence propre représente un critère de dimensionnement des éléments du filtre. Elle sera placée une décade avant les premiers harmoniques, soit $f_0 = 600 \text{ Hz}$.

À partir de maintenant, le filtre est supposé remplir son rôle d'atténuation des harmoniques et le système est étudié uniquement du point de vue du point de fonctionnement.

Le deuxième critère de dimensionnement choisi est la stabilité du filtre. Pour cela, il faut déterminer le comportement petit signal de l'ensemble convertisseur statique, sa charge et son contrôle. Le contrôle imposant un courant constant dans la batterie, la charge va être modélisée par une charge à puissance constante, dont la caractéristique courant-tension est représentée à la figure 12. Cette dernière est linéarisée autour du point de fonctionnement I_{e0} - V_{e0} .

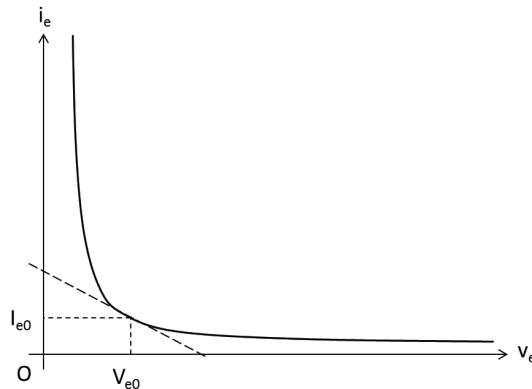


Figure 12 – Caractéristique de la charge

Q.46. Montrer que la charge (le convertisseur, son contrôle et la batterie) peut être modélisée par une résistance négative R_{ch} dans un modèle petit signal. Montrer que cette résistance négative a pour valeur $R_{ch} = -\frac{V_{e0}}{I_{e0}}$. Calculer la valeur de cette résistance pour le point nominal de fonctionnement du hacheur (puissance de 190 kW sous 540 V).

Suite à la modélisation de la charge par la résistance R_{ch} , le schéma petit signal permettant l'étude de la stabilité du filtre est donné à la figure 13.

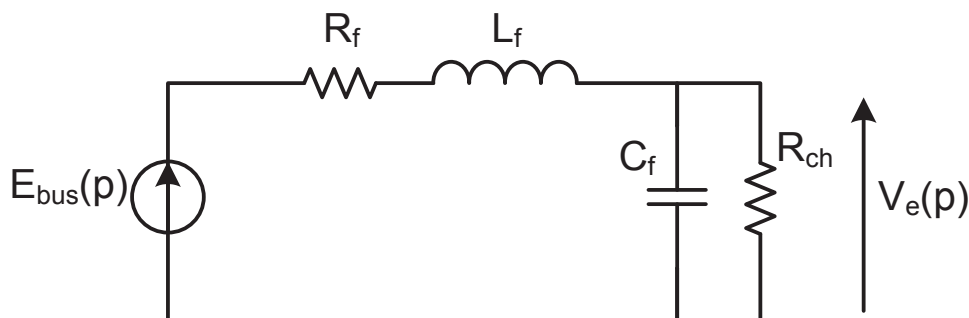


Figure 13 – Schéma étudié pour la stabilité du filtre

Q.47. La stabilité du filtre pouvant être déterminée à travers la stabilité de la tension aux bornes de la charge, déterminer la fonction de transfert $H(p) = \frac{V_e(p)}{E_{bus}(p)}$. Mettre cette fonction de transfert sous la forme canonique suivante, en précisant les paramètres K , ξ et ω_0 ,

$$H(p) = \frac{K}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

Q.48. Déterminer, à partir de l'expression de ξ , une condition sur L_f en fonction de R_f , C_f et R_{ch} permettant d'avoir un système stable.

Deux valeurs sont envisagées pour la capacité de filtrage : $C_{f1} = 4 \text{ mF}$ et $C_{f2} = 6 \text{ mF}$.

Q.49. Pour les deux valeurs de capacités, déterminer la valeur de l'inductance permettant d'obtenir la bonne fréquence de coupure et vérifier si les deux solutions permettent d'obtenir un filtre stable ou non. Conclure quant à la solution qui sera retenue.

Q.50. Imaginons que le niveau de puissance soit divisé par deux. Pour les deux dimensionnements de filtre de la question précédente, déterminer si les solutions sont stables ou non. Conclure quant à l'influence de la puissance sur la stabilité du filtre et sur la valeur de puissance à laquelle il vaut mieux faire le dimensionnement du filtre.

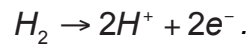
Un élément n'a pas été pris en compte jusque-là : l'inductance des câbles et de la source. Afin de l'intégrer, l'inductance L_f a une valeur minimale de $100 \mu\text{H}$.

Q.51. À la puissance nominale, existe-t-il une valeur de capacité pour le filtre permettant d'assurer la fréquence de coupure à 600 Hz tout en ayant un filtre stable ? Si non, déterminer un nouveau couple L_f - C_f assurant un filtre stable et donner la nouvelle valeur de la capacité C_f ainsi que la nouvelle fréquence de coupure du filtre. Conclure quant aux caractéristiques de ce nouveau filtre.

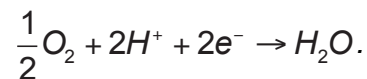
Partie D

Le projet Plathée a également servi de support afin de tester de nouvelles technologies dans le cadre des missions ferroviaires. Dans ce cadre, une pile à combustible de type PEM (membrane échangeuse de protons) basse température (fonctionnement autour de 70°C) a été expérimentée. Cette technologie de pile à combustible s'appuie sur une réaction d'oxydo-réduction entre du dihydrogène gazeux (H_2) et du dioxygène gazeux (O_2) afin de produire de l'eau (H_2O) et de l'énergie.

Au niveau de l'anode (électrode négative), le dihydrogène est mis en contact d'un catalyseur (platine) entraînant sa dissociation selon l'équation



La membrane ne laissant passer que les protons (H^+) et étant imperméable aux électrons (e^-), ces derniers sont collectés et circulent à travers le circuit électrique extérieur afin d'atteindre la cathode où la réaction suivante se produit



Cette réaction est exothermique entraînant un dégagement de chaleur. Il apparaît alors un potentiel aux bornes de la pile. Dans les conditions standards, cette tension s'élève à vide à 1,23 V, valeur notée E^0 . Par contre, quand la pile débite un courant, à cause de différentes pertes, la tension est plus faible et peut descendre jusqu'à 0,5 V. Par conséquent, afin d'avoir un usage plus facile de cette source, plusieurs éléments sont connectés en série.

Le système installé sur la locomotive Plathée est constitué de deux cœurs de pile de 110 éléments chacun, les deux cœurs de pile étant connectés électriquement en série. Par conséquent, le système sera considéré comme une seule pile de 220 éléments. Certaines données étant confidentielles, les valeurs utilisées pour ce sujet sont extrapolées des paramètres d'une autre pile de technologie similaire. La caractéristique d'une cellule élémentaire est fournie à la figure R.12 du dossier ressources.

Notations et valeurs de certains paramètres :

- Force électromotrice standard $E^0 = 1,23 \text{ V}$;
- Nombre d'éléments en série $n_{PAC} = 220$;
- Surface d'une cellule élémentaire $S_{PAC} = 750 \text{ cm}^2$.

Q.52. Déterminer la tension au point de puissance nominale de la pile à combustible sachant que ce point nominal correspond à une densité de $0,8 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$. En déduire la puissance nominale de la pile à combustible.

Le rendement d'un cœur de pile à combustible est le produit de trois rendements : le rendement faradique, le rendement enthalpique et le rendement voltaïque. Les deux premiers seront considérés unitaires et le rendement voltaïque η_E , est défini par

$$\eta_E = \frac{E_{PAC}(I_{PAC})}{E^0},$$

où E_{PAC} est la valeur de la tension aux bornes de la pile pour le courant débité I_{PAC} .

Q.53. Tracer l'évolution du rendement d'une cellule élémentaire pour une densité de courant de 0 à 1 A·cm⁻². Conclure quant à l'évolution du rendement de la pile et à son utilisation à son courant nominal.

Afin d'alléger le système, la pile utilisée fonctionne avec de l'air comprimé issu d'un compresseur plutôt que du dioxygène pur, ce qui permet de se passer de son stockage. Par ailleurs, la réaction étant exothermique, il faut un système de refroidissement. Par conséquent, la pile doit alimenter ses auxiliaires, ce qui fait que la puissance de sortie est amputée de la puissance de ses auxiliaires, soit 14 kW au point de puissance nominale.

Q.54. Donner le rendement du cœur de pile au point de puissance nominale. En tenant compte des auxiliaires, donner le rendement global du système pile à combustible à ce point nominal. Conclure quant à cette valeur par rapport à un groupe thermique Diesel.

Le point nominal de la pile à combustible correspond à la puissance moyenne à fournir lors du profil de triage. L'idée est de comparer l'usage du groupe Diesel avec la pile à combustible. La constante de Faraday représente la charge électrique d'une mole de charges élémentaires. Elle se note F et vaut $F = 96\,485\text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Q.55. La pile fournissant son courant nominal, déterminer le nombre de moles de dihydrogène consommé sur la mission de triage (profil 2) d'une durée de 1 600 secondes. Il est fait l'hypothèse que tout l'hydrogène consommé a servi à la réaction, soit que chaque électron circulant dans le circuit électrique vient de la dissociation du dihydrogène. Par ailleurs, il faut penser qu'il y a n_{PAC} éléments de pile en série.

Le stockage de dihydrogène se fait avec 18 bouteilles de B50 où chaque bouteille renferme 8,8 Nm³ (Normaux m³) dont 8 utilisables. 1 Normaux m³ signifie que le gaz, sous pression atmosphérique et conditions standards, représenterait un volume d'un m³. De plus, le volume molaire standard est de 22,4 L·mol⁻¹.

Q.56. Calculer le nombre total de moles utilisables stockées dans les bouteilles de dihydrogène. Cela est-il suffisant afin d'assurer la mission de triage (profil 2) d'une durée de 1 600 s ? Si oui, calculer la durée maximale que ce stockage permettrait d'assurer avec le profil de triage (profil 2).

La masse molaire du dihydrogène est de 2 g·mol⁻¹. Par ailleurs, le pouvoir calorifique massique du dihydrogène est de 120 kJ·g⁻¹ tandis que celui du gazole est de 42,5 kJ·g⁻¹.

Q.57. Calculer la masse de dihydrogène consommée sur le profil de triage (profil 2) de 1 600 secondes. Sachant que la consommation électrique de la locomotive est de 32,5 kW·h, calculer le rendement d'utilisation énergétique du dihydrogène définie par l'énergie utile divisée par le pouvoir calorifique total du combustible consommé.

Q.58. Sachant que le groupe Diesel consomme 6,95 kg de gazole pour accomplir le même profil, calculer le rendement d'utilisation du gazole pour ce profil. Comparer les deux résultats pour le dihydrogène et le gazole et conclure.

La masse d'une bouteille B50 à vide est de 70 kg. Par ailleurs, chaque cadre de 9 bouteilles coûte 700 €. De son côté, le prix du gazole est d'environ 1 €·L⁻¹.

Q.59. En intégrant la masse du stockage, recalculer le pouvoir calorifique massique du dihydrogène. Par ailleurs, calculer le coût du dihydrogène consommé ainsi que celui du gazole afin d'assurer la mission de triage. Conclure sur la comparaison des deux technologies.

DOSSIER RESSOURCES

PARTIE A :

Figure R.1 – Profil 1 : mission de desserte locale

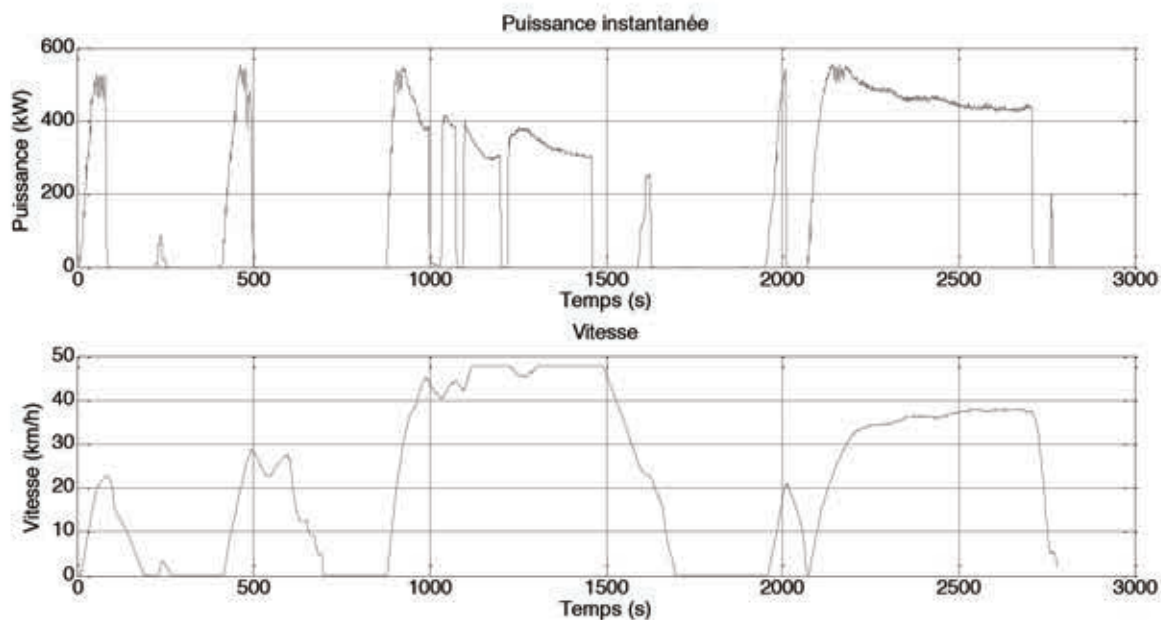


Figure R.2 – Profil 2 : mission de triage

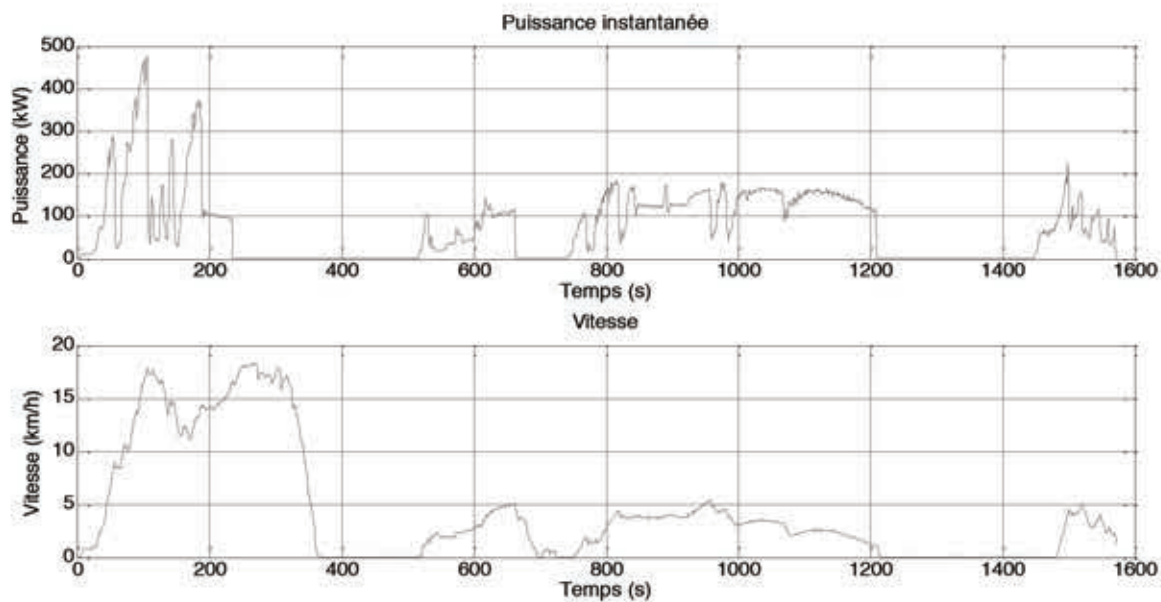


Figure R.3 – Profil 3 : mission simplifiée

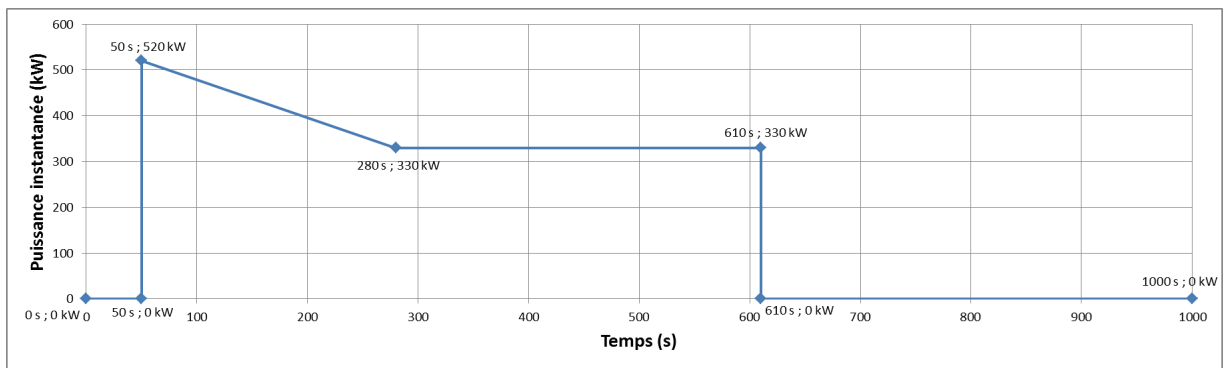


Figure R.4 – Cartographie de consommation d'un groupe Diesel de 215 kW électrique

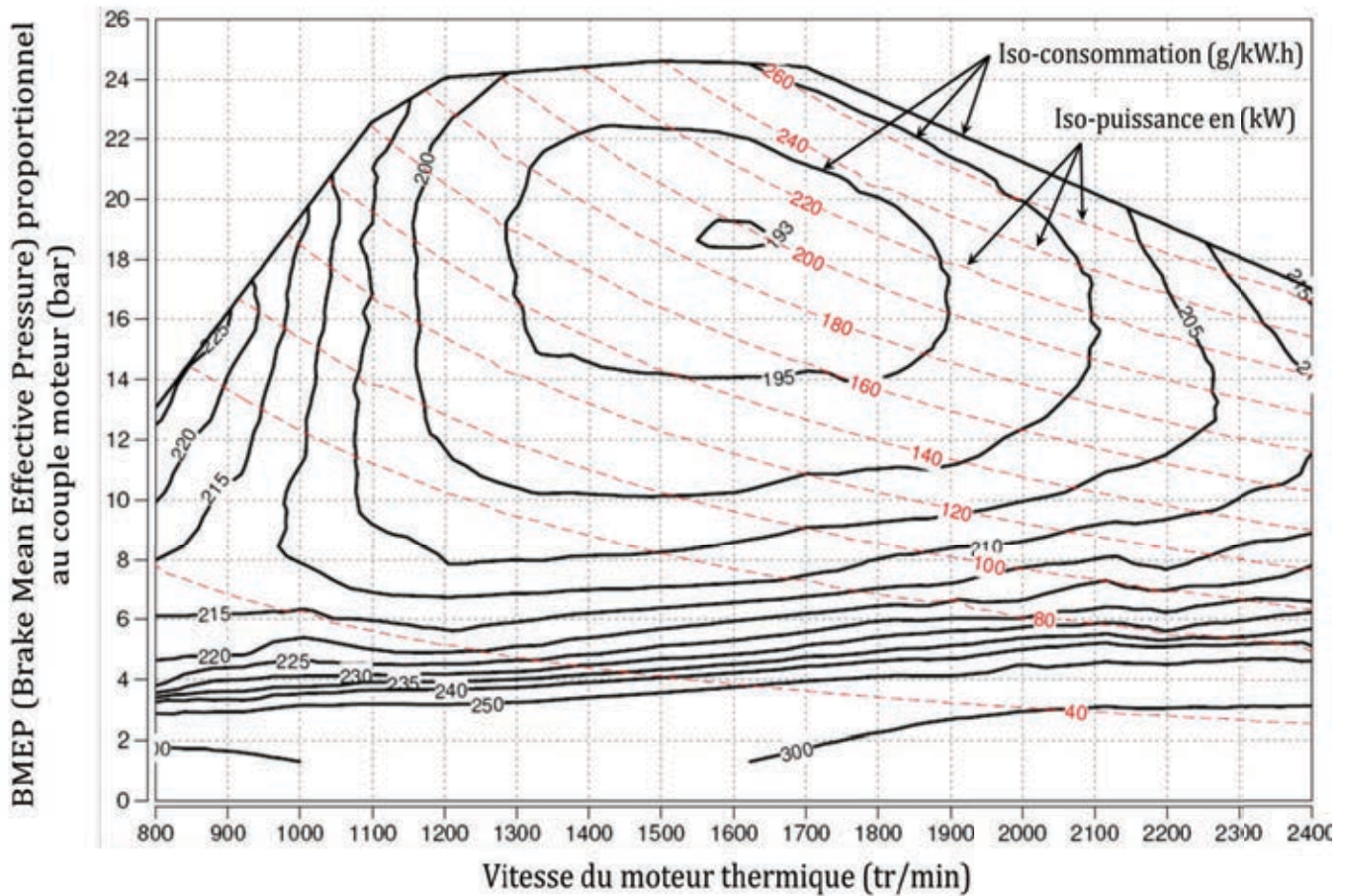
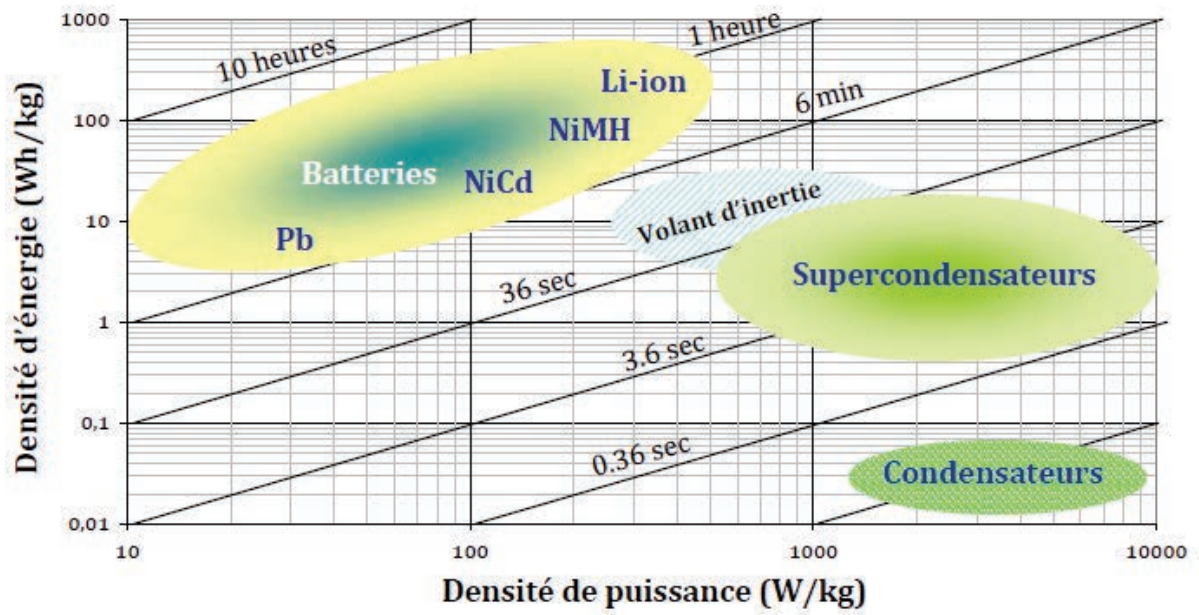


Tableau R.1 – Distribution des occurrences sur les deux profils de mission (pourcentage de la puissance de 610 kW) en secondes

Puissance (pourcentage de 610 kW)	20 %	40%	50%	60%	80%	90%	100%
Desserte locale (profil 1)	1689 s	65 s	204 s	269 s	680 s	93 s	0 s
Triage (profil 2)	1500 s	55 s	13 s	23 s	9 s	0 s	0 s

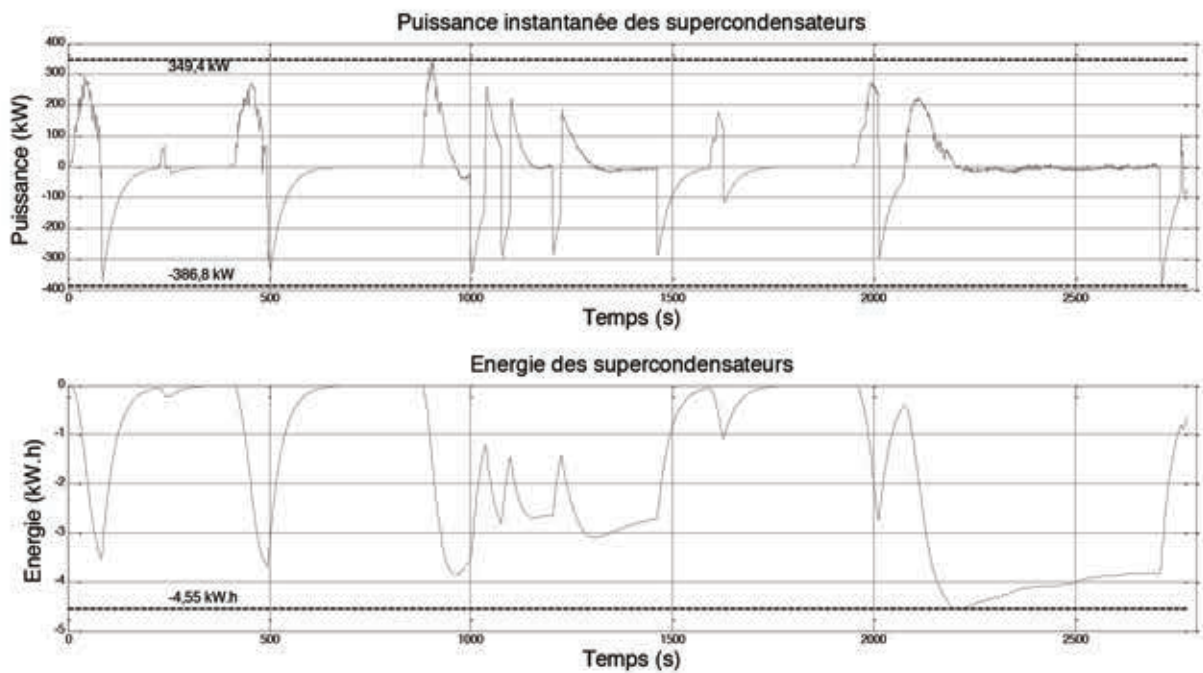
Figure R.5 – Plan de Ragone des éléments de stockage



PARTIE B :

Figure R.6 – Profil 1 : mission de desserte locale

Supercondensateurs



Batteries d'accumulateurs NiCd

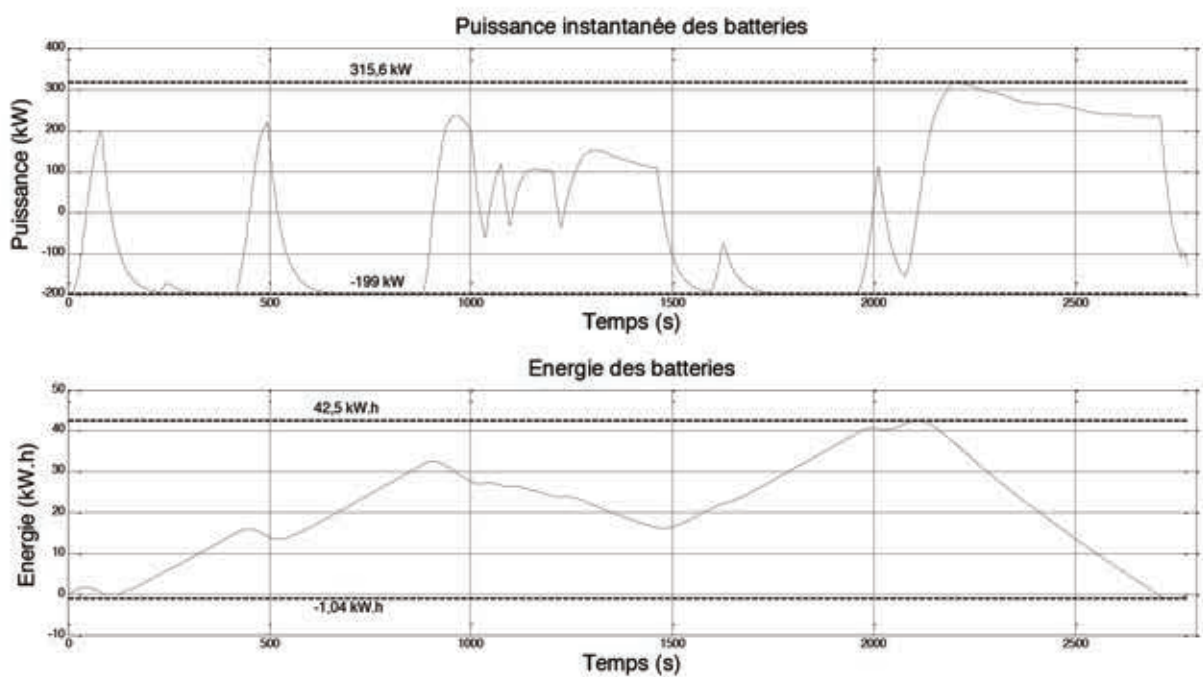
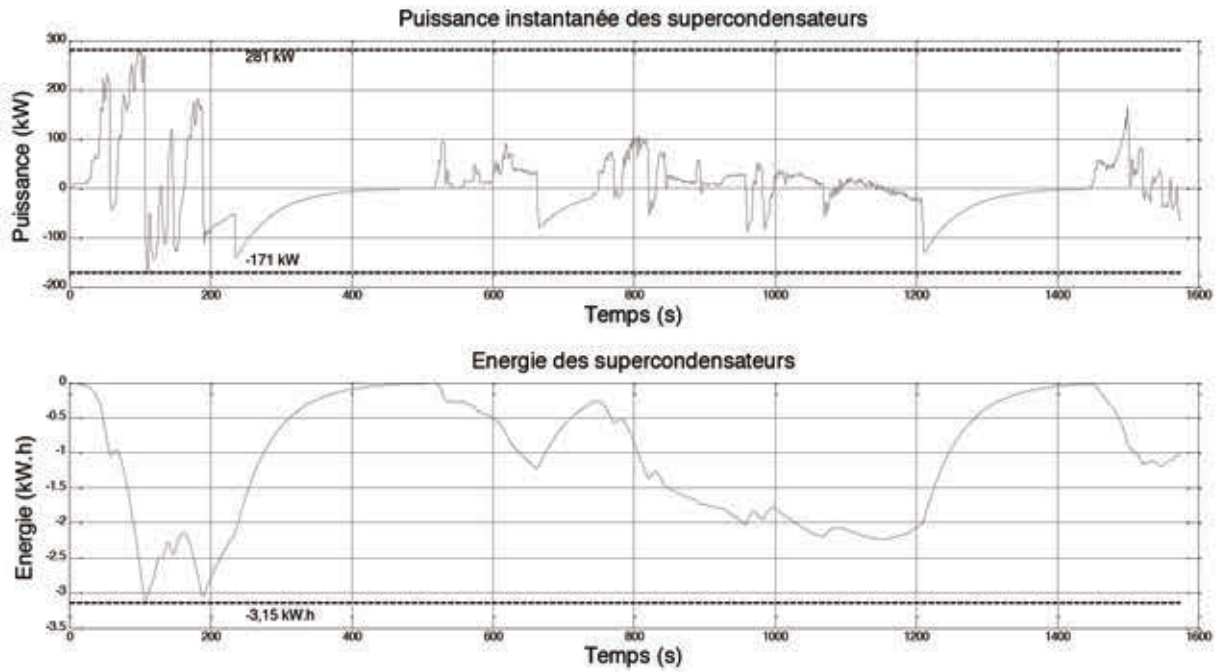


Figure R.7 – Profil 2 : mission de triage

Supercondensateurs



Batteries d'accumulateurs NiCd

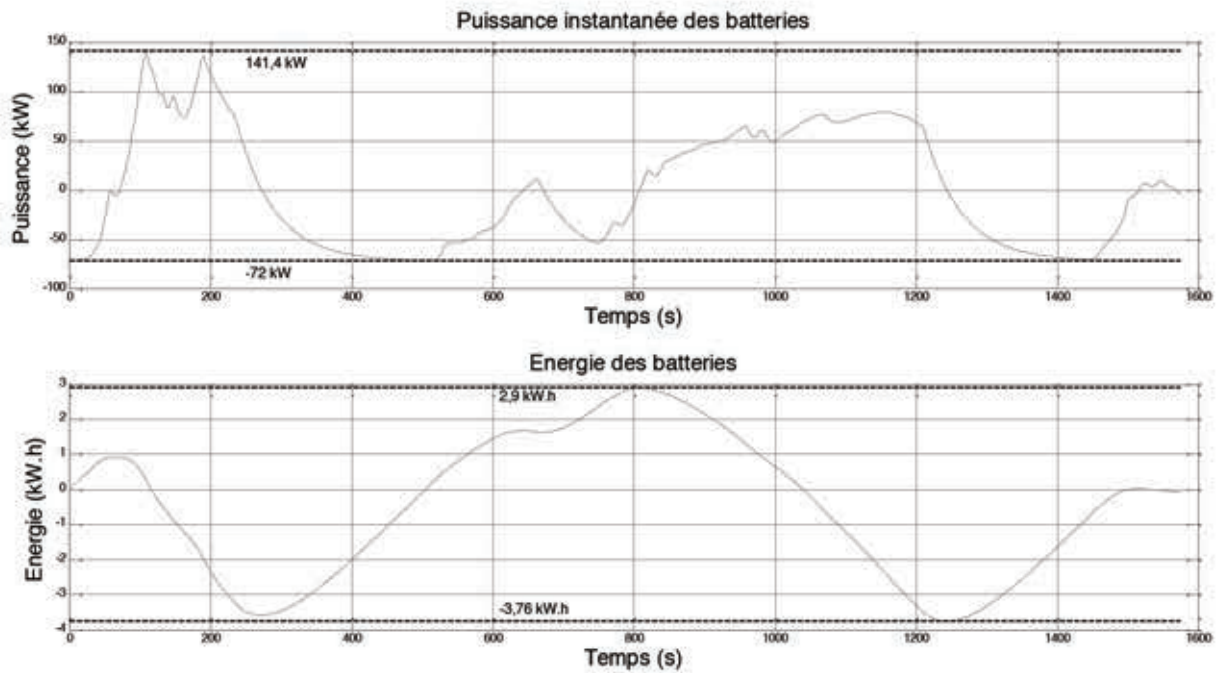


Figure R.8 – Données constructeur des supercondensateurs



UltraCap®

B49410B2506Q000

Single cell, 5000 F/ 2.5 V

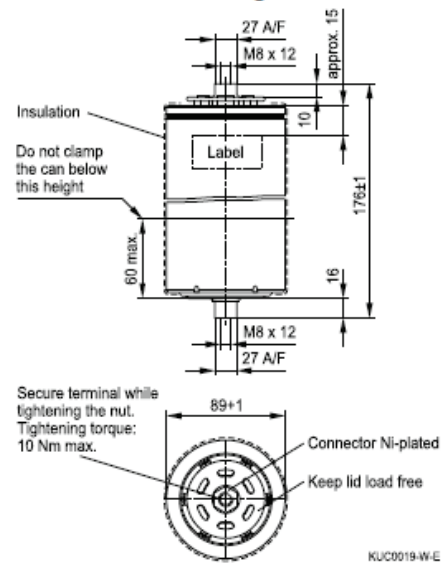
Features

- Screw terminals M8 × 12
- Power type
- Insulated with polyurethane
- Short-circuit-proof

Note

- Do not put into fire!
- Do not open the capacitor!
- To avoid health and fire hazards, do not operate the capacitor beyond the voltage or temperature limits given in the data sheet. Any excess may also result in a reduction of lifetime.
- Please pay also attention to the transport and waste disposal instructions in chapter "Cautions".

Dimensional drawing



Dimensions in mm

Electrical specifications

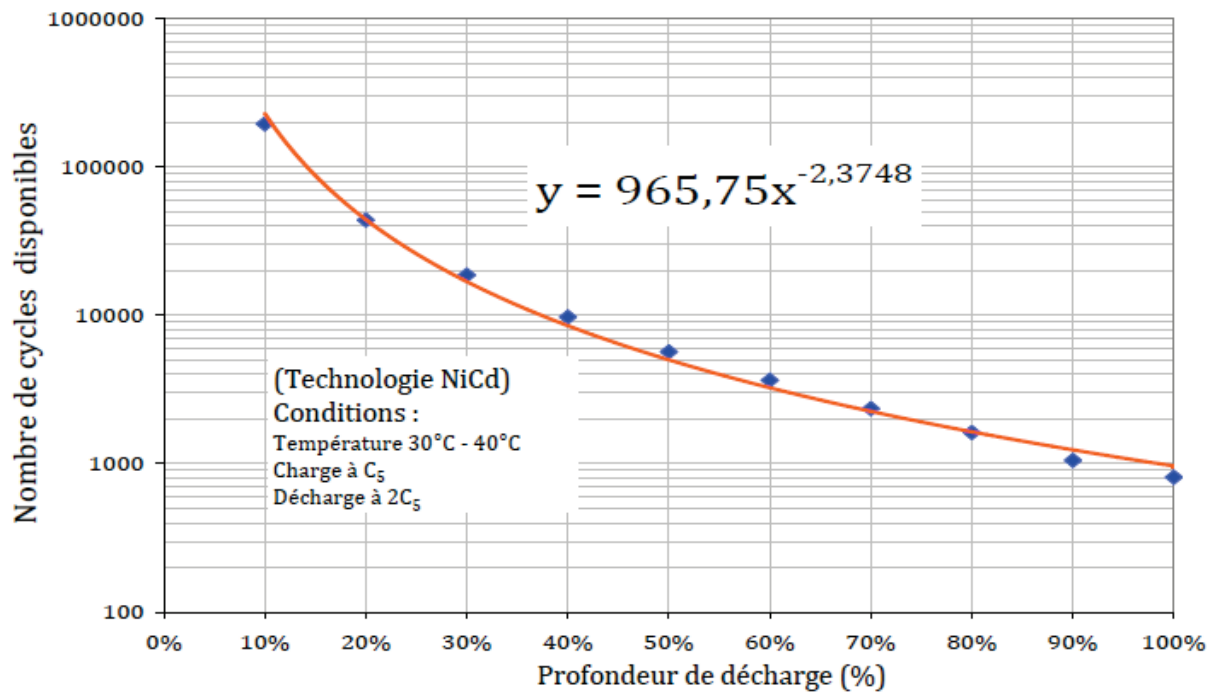
Rated capacitance	($T_A = 25\text{ °C}$; DCC) ¹⁾	C_R	5000	F
Tolerance of C_R			-10/+30	%
Rated voltage	($T_A = 25\text{ °C}$)	V_R	2.5	V
Capacity			3500	mAh
Specific power	(IEC 62391-2)		2.0	kW/kg
Specific power	(IEC 62391-2)		2.3	kW/l
Stored energy	($V = V_R$)	E	15625	J
Specific energy	($V = V_R$)		4.1	Wh/kg
Specific energy	($V = V_R$)		4.7	Wh/l
Surge voltage		V_{surge}	2.8	V
Maximum series resistance	($T_A = 25\text{ °C}$; 1 kHz)	ESR	180	$\mu\Omega$
Maximum series resistance	($T_A = 25\text{ °C}$; 50 mHz)	ESR_{DC}	350	$\mu\Omega$
Weight			1050	g
Volume	(without terminals)		0.93	l
Operating temperature range		T_{op}	-30/+70	°C
Storage temperature	($V = 0\text{ V}$)	T_{st}	-40/+70	°C
Lifetime (hours) ²⁾	($T_A = 25\text{ °C}$; $V = V_R$)		90000	h
Lifetime (cycles) ³⁾	($T_A = 25\text{ °C}$; $I = 100\text{ A}$)		500000	cycles

1) DCC: discharging with constant current.

2) Requirements: $|\Delta C/C_R| \leq 30\%$, $ESR \leq 2$ times of specified limit, $I_{\text{load}} \leq 2$ times of initial value.


3) Requirements: $|\Delta C/C_R| \leq 30\%$, $ESR \leq 2$ times of specified limit, $I_{\text{load}} \leq 2$ times of initial value (1 cycle: charging to V_R , 30 s rest, discharging to $V_R/2$, 30 s rest).

Figure R.9 – Graphe de durée de vie d'une cellule NiCd



PARTIE C :

Figure R.10 – Données constructeur du FF450R12ME3 :

Technische Information / Technical Information				
IGBT-Module IGBT-modules <h1 style="text-align: center;">FF450R12ME3</h1>				
EconoDUAL™ Modul mit Trench/Feldstop IGBT3 und High Efficiency Diode EconoDUAL™ module with trench/fieldstop IGBT3 and Emitter Controlled High Efficiency diode				
IGBT, Wechselrichter / IGBT, Inverter Höchstzulässige Werte / Maximum Rated Values		Vorläufige Daten Preliminary Data		
Kollektor-Emitter-Sperrspannung Collector-emitter voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{CES}	1200	V
Kollektor-Dauergleichstrom Continuous DC collector current	$T_C = 80^{\circ}\text{C}, T_{vj\max} = 150^{\circ}\text{C}$ $T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj\max} = 150^{\circ}\text{C}$	$I_{C\text{nom}}$ I_C	450 600	A A
Periodischer Kollektor-Spitzenstrom Repetitive peak collector current	$t_p = 1\text{ ms}$	$I_{C\text{RM}}$	900	A
Gesamt-Verlustleistung Total power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj\max} = 150$	P_{tot}	2100	W
Gate-Emitter-Spitzenspannung Gate-emitter peak voltage		V_{GES}	+/-20	V
Charakteristische Werte / Characteristic Values		min. typ. max.		
Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung Collector-emitter saturation voltage	$I_C = 450\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$ $I_C = 450\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	$V_{CE\text{sat}}$	1,70 2,00 2,15 V V
Gate-Schwellenspannung Gate threshold voltage	$I_C = 18,0\text{ mA}, V_{CE} = V_{GE}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		$V_{GE\text{th}}$	5,0 5,8 6,5 V
Gateladung Gate charge	$V_{GE} = -15\text{ V} \dots +15\text{ V}$		Q_G	4,30 μC
Interner Gatewiderstand Internal gate resistor	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		R_{Gint}	1,7 Ω
Eingangskapazität Input capacitance	$f = 1\text{ MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}$		C_{iss}	32,0 nF
Rückwirkungskapazität Reverse transfer capacitance	$f = 1\text{ MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}$		C_{res}	1,50 nF
Kollektor-Emitter-Reststrom Collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = 1200\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{CES}	5,0 mA
Gate-Emitter-Reststrom Gate-emitter leakage current	$V_{CE} = 0\text{ V}, V_{GE} = 20\text{ V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{GES}	400 nA
Einschaltverzögerungszeit, induktive Last Turn-on delay time, inductive load	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{\text{Gon}} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	t_{don}	0,25 0,30 μs μs
Anstiegszeit, induktive Last Rise time, inductive load	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{\text{Gon}} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	t_r	0,09 0,10 μs μs
Abschaltverzögerungszeit, induktive Last Turn-off delay time, inductive load	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{\text{Goff}} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	t_{doff}	0,55 0,65 μs μs
Fallzeit, induktive Last Fall time, inductive load	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{\text{Goff}} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	t_f	0,13 0,16 μs μs
Einschaltverlustenergie pro Puls Turn-on energy loss per pulse	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}, L_S = 80\text{ nH}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}, di/dt = 7800\text{ A}/\mu\text{s}$ $R_{\text{Gon}} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	E_{on}	22,0 33,0 mJ mJ
Abschaltverlustenergie pro Puls Turn-off energy loss per pulse	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}, L_S = 80\text{ nH}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}, du/dt = 3600\text{ V}/\mu\text{s}$ $R_{\text{Goff}} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	E_{off}	43,0 65,0 mJ mJ
Kurzschlussverhalten SC data	$V_{GE} \leq 15\text{ V}, V_{CC} = 900\text{ V}$ $V_{CE\text{max}} = V_{CES} - L_{\text{SC}} \cdot di/dt$ $t_p \leq 10\ \mu\text{s}, T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$		I_{SC}	1800 A
Wärmewiderstand, Chip bis Gehäuse Thermal resistance, junction to case	pro IGBT / per IGBT		R_{thJC}	0,06 K/W
Wärmewiderstand, Gehäuse bis Kühlkörper Thermal resistance, case to heatsink	pro IGBT / per IGBT $\lambda_{\text{paste}} = 1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ / $\lambda_{\text{grease}} = 1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		R_{thCH}	0,03 K/W
Temperatur im Schaltbetrieb Temperature under switching conditions			$T_{vj\text{op}}$	-40 125 $^{\circ}\text{C}$
prepared by: MB	date of publication: 2013-10-03			
approved by: MK	revision: 2.2			

Vorläufige Daten
Preliminary Data

Diode, Wechselrichter / Diode, Inverter

Höchstzulässige Werte / Maximum Rated Values

Periodische Spitzensperrespannung Repetitive peak reverse voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{RRM}	1200	V
Dauergleichstrom Continuous DC forward current		I_F	450	A
Periodischer Spitzenstrom Repetitive peak forward current	$t_p = 1 \text{ ms}$	I_{FRM}	900	A
Grenzlastintegral Pt - value	$V_R = 0 \text{ V}, t_p = 10 \text{ ms}, T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	Pt	35000	A ² s

Charakteristische Werte / Characteristic Values

			min.	typ.	max.	
Durchlassspannung Forward voltage	$I_F = 450 \text{ A}, V_{GE} = 0 \text{ V}$ $I_F = 450 \text{ A}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	V_F	1,65 1,65	2,15	V V
Rückstromspitze Peak reverse recovery current	$I_F = 450 \text{ A}, -di_F/dt = 7800 \text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=125^{\circ}\text{C})$ $V_R = 600 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	I_{RM}	315 405		A A
Sperrverzögerungsladung Recovered charge	$I_F = 450 \text{ A}, -di_F/dt = 7800 \text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=125^{\circ}\text{C})$ $V_R = 600 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	Q_r	45,0 85,0		μC μC
Abschaltenergie pro Puls Reverse recovery energy	$I_F = 450 \text{ A}, -di_F/dt = 7800 \text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=125^{\circ}\text{C})$ $V_R = 600 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	E_{rec}	21,0 39,0		mJ mJ
Wärmewiderstand, Chip bis Gehäuse Thermal resistance, junction to case	pro Diode / per diode		R_{thJC}		0,10	K/W
Wärmewiderstand, Gehäuse bis Kühlkörper Thermal resistance, case to heatsink	pro Diode / per diode $\lambda_{Paste} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) / \lambda_{grasse} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		R_{thCH}	0,05		K/W
Temperatur im Schaltbetrieb Temperature under switching conditions			$T_{vj\text{op}}$	-40	125	$^{\circ}\text{C}$

NTC-Widerstand / NTC-Thermistor

Charakteristische Werte / Characteristic Values

			min.	typ.	max.	
Nennwiderstand Rated resistance	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$		R_{25}	5,00		k Ω
Abweichung von R100 Deviation of R100	$T_C = 100^{\circ}\text{C}, R_{100} = 493 \Omega$		$\Delta R/R$	-5	5	%
Verlustleistung Power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$		P_{25}		20,0	mW
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{2560}(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$		B_{2560}	3375		K
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{2580}(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$		B_{2580}	3411		K
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25100}(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$		B_{25100}	3433		K

Angaben gemäß gültiger Application Note.
Specification according to the valid application note.

prepared by: MB	date of publication: 2013-10-03
approved by: MK	revision: 2.2

Technische Information / Technical Information

IGBT-Module
IGBT-modules

FF450R12ME3



Vorläufige Daten
Preliminary Data

Modul / Module

Isolations-Prüfspannung Isolation test voltage	RMS, f = 50 Hz, t = 1 min.	V _{ISOL}	2,5		kV
Material Modulgrundplatte Material of module baseplate			Cu		
Innere Isolation Internal isolation	Basisisolierung (Schutzklasse 1, EN61140) basic insulation (class 1, IEC 61140)		Al ₂ O ₃		
Kriechstrecke Creepage distance	Kontakt - Kühlkörper / terminal to heatsink Kontakt - Kontakt / terminal to terminal		14,5 13,0		mm
Luftstrecke Clearance	Kontakt - Kühlkörper / terminal to heatsink Kontakt - Kontakt / terminal to terminal		12,5 10,0		mm
Vergleichszahl der Kriechwegbildung Comperative tracking index		CTI	> 225		
			min.	typ.	max.
Wärmewiderstand, Gehäuse bis Kühlkörper Thermal resistance, case to heatsink	pro Modul / per module $\lambda_{\text{Paste}} = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} / \lambda_{\text{Grasse}} = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	R _{thCH}	0,009		K/W
Modulstreuinduktivität Stray inductance module		L _{stCE}	20		nH
Modulleitungswiderstand, Anschlüsse - Chip Module lead resistance, terminals - chip	T _C = 25°C, pro Schalter / per switch	R _{OC+EE}	1,10		mΩ
Lagertemperatur Storage temperature		T _{stg}	-40	125	°C
Anzugsdrehmoment f. Modulmontage Mounting torque for modul mounting	Schraube M5 - Montage gem. gültiger Applikationsschrift Screw M5 - Mounting according to valid application note	M	3,00	-	6,00 Nm
Anzugsdrehmoment f. elektr. Anschlüsse Terminal connection torque	Schraube M6 - Montage gem. gültiger Applikationsschrift Screw M6 - Mounting according to valid application note	M	3,0	-	6,0 Nm
Gewicht Weight		G	345		g

prepared by: MB

date of publication: 2013-10-03

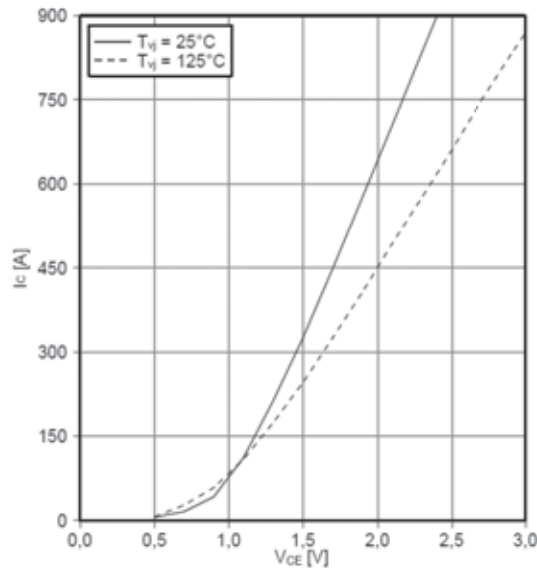
approved by: MK

revision: 2.2

Vorläufige Daten
Preliminary Data

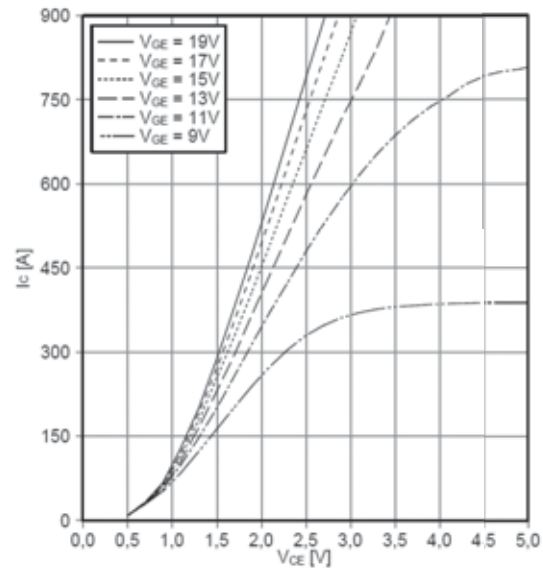
Ausgangskennlinie IGBT, Wechselrichter (typisch)
output characteristic IGBT, Inverter (typical)

$I_C = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = 15\text{ V}$



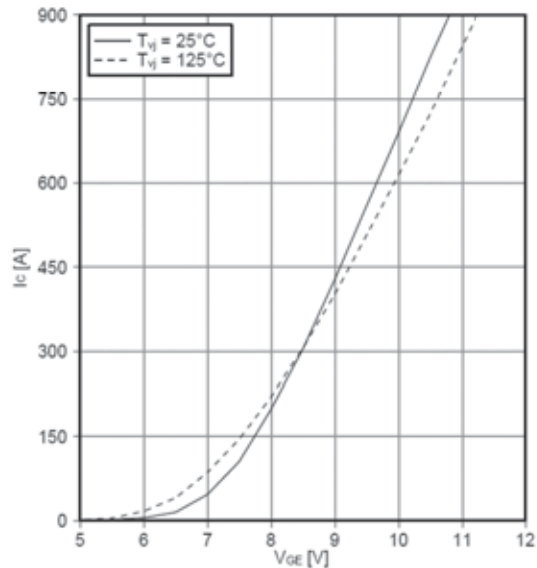
Ausgangskennlinienfeld IGBT, Wechselrichter (typisch)
output characteristic IGBT, Inverter (typical)

$I_C = f(V_{CE})$
 $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$



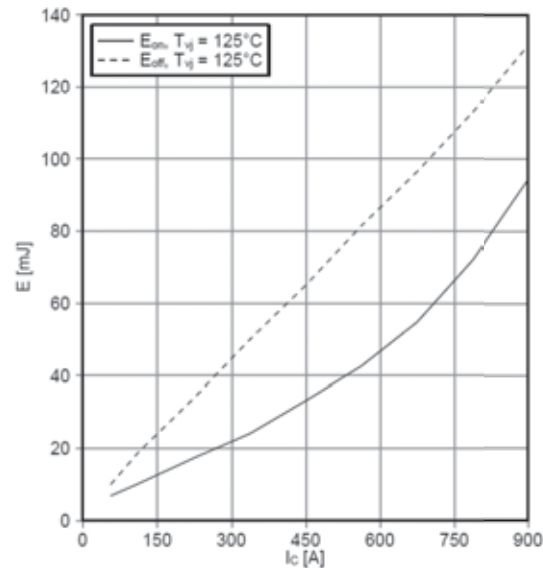
Übertragungscharakteristik IGBT, Wechselrichter (typisch)
transfer characteristic IGBT, Inverter (typical)

$I_C = f(V_{GE})$
 $V_{CE} = 20\text{ V}$



Schaltverluste IGBT, Wechselrichter (typisch)
switching losses IGBT, Inverter (typical)

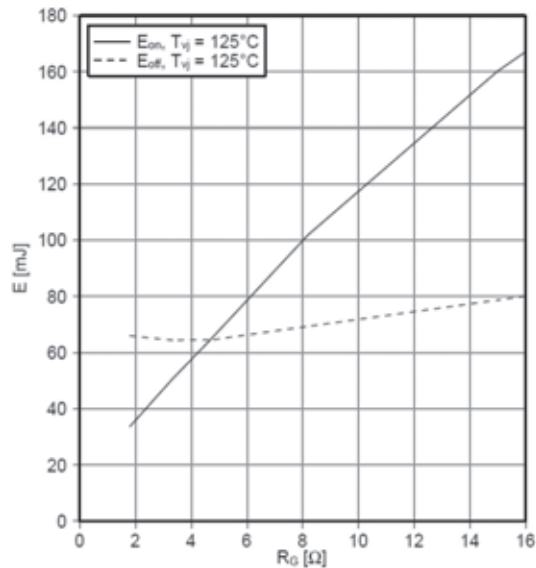
$E_{on} = f(I_C)$, $E_{off} = f(I_C)$
 $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_{Gon} = 1.6\ \Omega$, $R_{Goff} = 1.6\ \Omega$, $V_{CE} = 600\text{ V}$



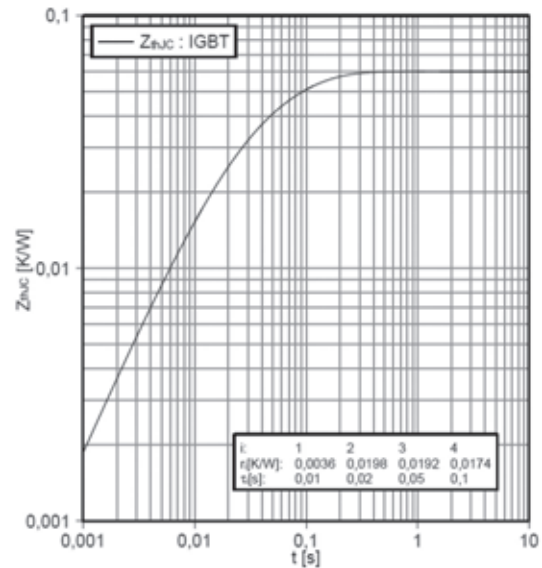
prepared by: MB	date of publication: 2013-10-03
approved by: MK	revision: 2.2

Vorläufige Daten
Preliminary Data

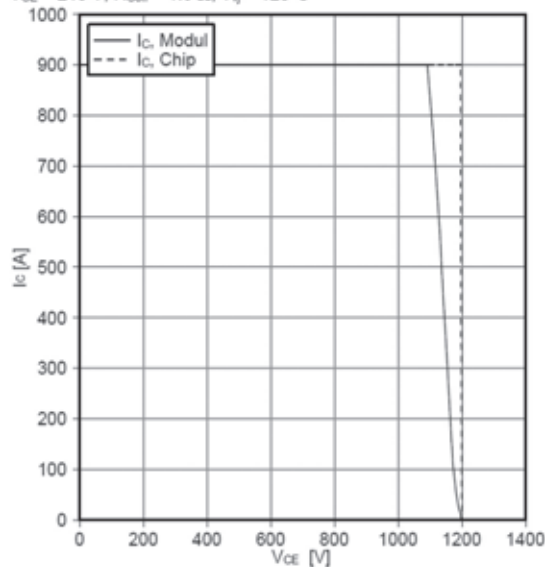
Schaltverluste IGBT, Wechselrichter (typisch)
switching losses IGBT, Inverter (typical)
 $E_{on} = f(R_G)$, $E_{off} = f(R_G)$
 $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $I_C = 450\text{ A}$, $V_{CE} = 600\text{ V}$



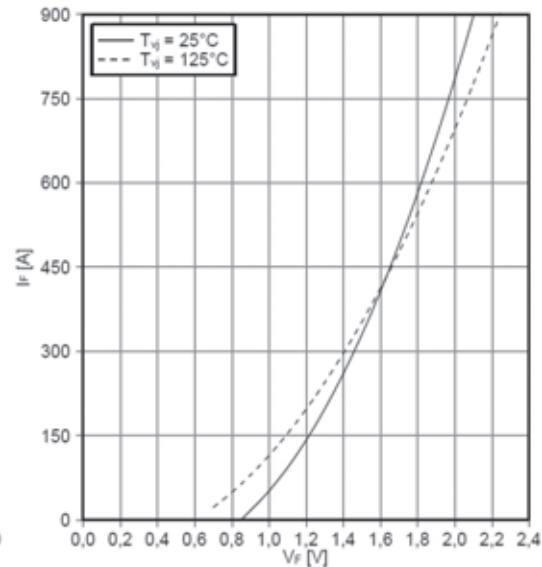
Transienter Wärmewiderstand IGBT, Wechselrichter
transient thermal impedance IGBT, Inverter
 $Z_{thJC} = f(t)$



Sicherer Rückwärts-Arbeitsbereich IGBT, Wechselrichter
(RBSOA)
reverse bias safe operating area IGBT, Inverter (RBSOA)
 $I_C = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_{Goff} = 1.6\ \Omega$, $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$



Durchlasskennlinie der Diode, Wechselrichter (typisch)
forward characteristic of Diode, Inverter (typical)
 $I_F = f(V_F)$

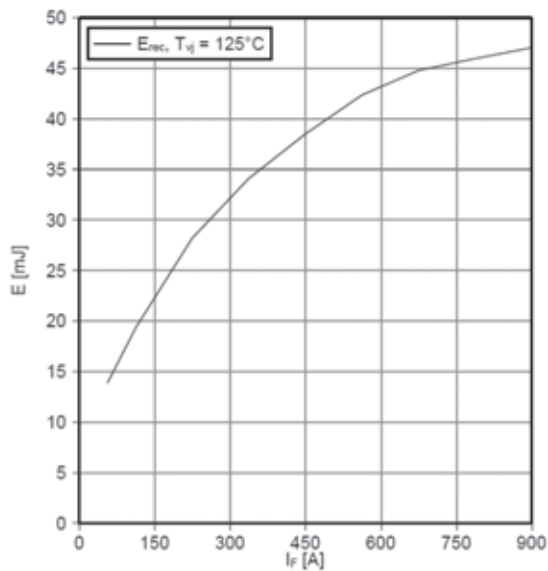


prepared by: MB	date of publication: 2013-10-03
approved by: MK	revision: 2.2

Vorläufige Daten
Preliminary Data

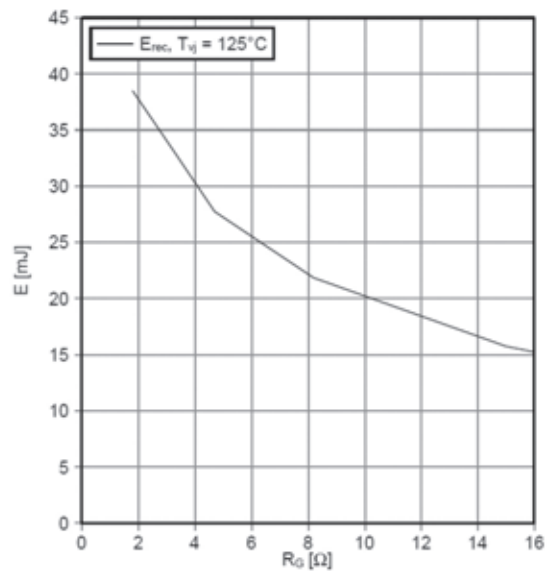
Schaltverluste Diode, Wechselrichter (typisch)
switching losses Diode, Inverter (typical)

$E_{rec} = f(I_F)$
 $R_{Gon} = 1.6 \Omega, V_{CE} = 600 V$



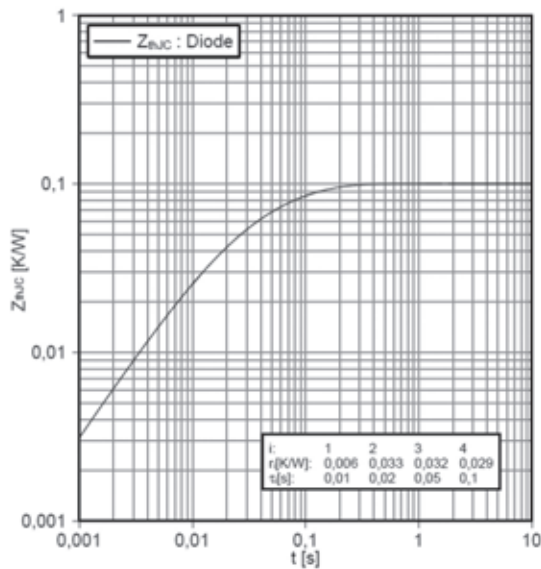
Schaltverluste Diode, Wechselrichter (typisch)
switching losses Diode, Inverter (typical)

$E_{rec} = f(R_G)$
 $I_F = 450 A, V_{CE} = 600 V$



Transienter Wärmewiderstand Diode, Wechselrichter
transient thermal impedance Diode, Inverter

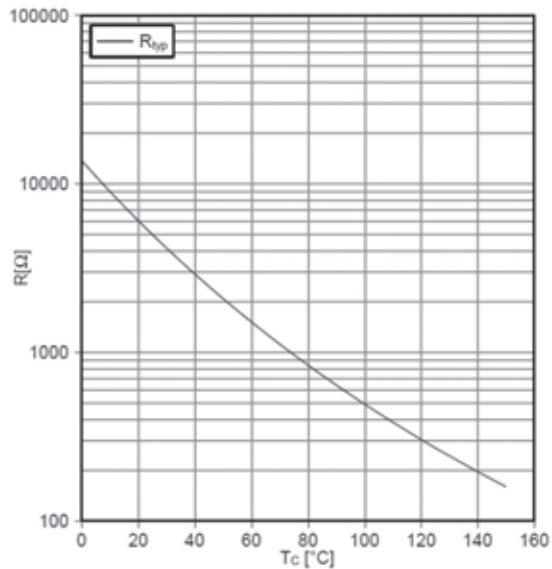
$Z_{thJC} = f(t)$



t	1	2	3	4
r [K/W]	0,006	0,033	0,032	0,029
t [s]	0,01	0,02	0,05	0,1

NTC-Widerstand-Temperaturkennlinie (typisch)
NTC-Thermistor-temperature characteristic (typical)

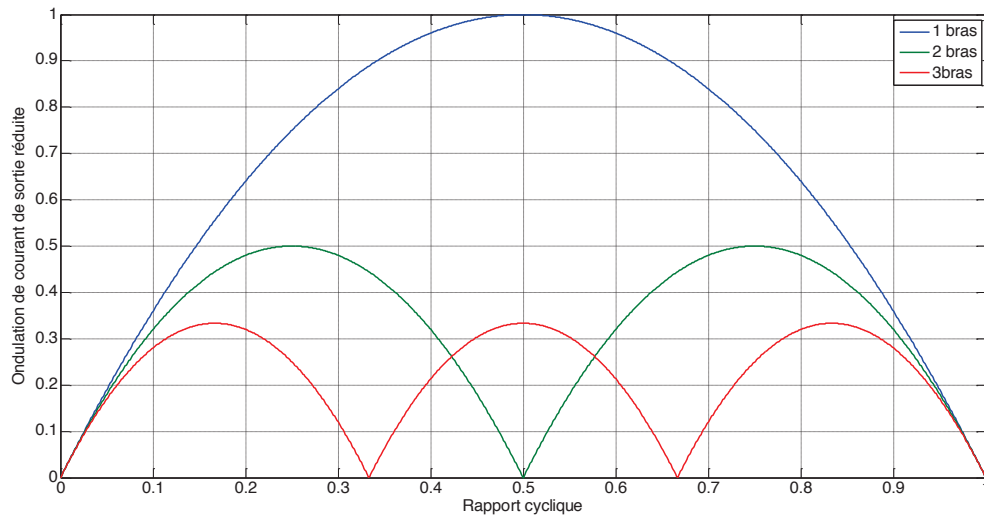
$R = f(T)$



prepared by: MB	date of publication: 2013-10-03
approved by: MK	revision: 2.2

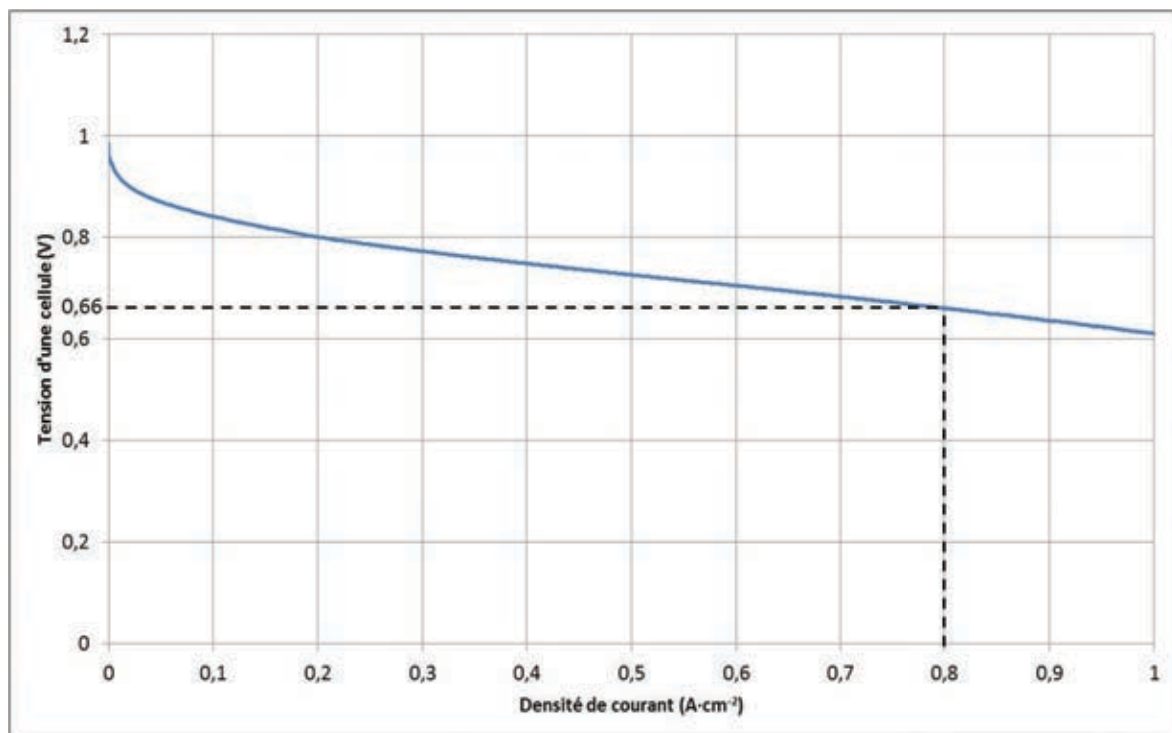
Figure R.11 – Ondulation de courant de sortie réduite :

L'ondulation de courant de sortie réduite est définie par le ratio de l'ondulation du courant de sortie par l'ondulation maximum d'un courant de phase.



PARTIE D :

Figure R.12 – Caractéristique d'une cellule élémentaire de la pile à combustible :



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DOCUMENT RÉPONSE A

Question Q.2

Tableau 1 – Données issues des deux profils de mission

	Energie consommée	Puissance moyenne	Puissance maximale	PHP
Desserte locale (profil 1)	555,35 MJ	185,12 kW	557,52 kW	
Triage (profil 2)	117 MJ	73,14 kW	477 kW	
Mission simplifiée (profil 3)				

Question Q.4

Tableau 2 – Consommation spécifique du moteur Diesel de 215 kW électrique

Puissance (pourcentage de 215 kW)	20 %	40%	50%	60%	80%	90%	100%
Puissance (kW)							
Consommation spécifique ($\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$)							

Question Q.5

Tableau 3 – Consommation spécifique du moteur Diesel de 610 kW électrique

Puissance (pourcentage de 610 kW)	20 %	40%	50%	60%	80%	90%	100%
Puissance (kW)							
Consommation spécifique ($\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$)							

Questions Q.6, Q.7

Tableau 4 – Consommation de gazole en litres en mode non-hybridé ou hybridé et gain de consommation obtenu

	Diesel de 610 kW	Diesel de 215 kW	Gain de consommation (en %)
Desserte locale (profil 1)			
Triage (profil 2)			

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DOCUMENT RÉPONSE B

Question Q.11

Tableau 5 – Caractéristiques énergétiques des supercondensateurs pour les deux profils de mission

	$ P_{SC} _{max}$ (kW)	Eu_{SC} (kW·h)	$f_{p,SC}$ (Hz)
Desserte locale (profil 1)			
Triage (profil 2)			

Question Q.23

Tableau 6 – Caractéristiques énergétiques des batteries d'accumulateurs NiCd pour les deux profils de mission

	$ P_{Bat} _{max}$ (kW)	Eu_{Bat} (kW·h)	$f_{p,Bat}$ (Hz)
Desserte locale (profil 1)			
Triage (profil 2)			

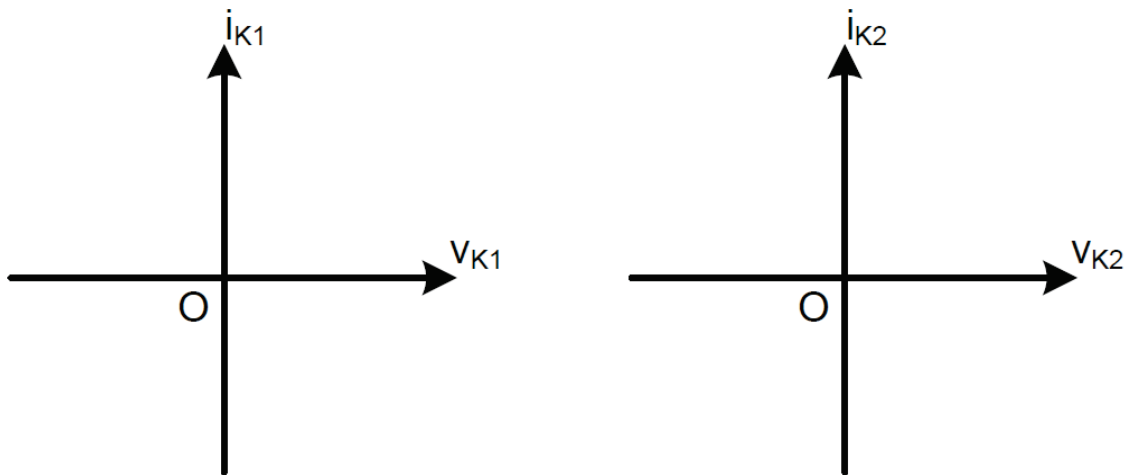
Question Q.25

Tableau 7 – Caractéristiques énergétiques des batteries d'accumulateurs NiCd pour les deux profils de mission

	Profondeur de cycle	Nombre de cycles autorisés
Desserte locale (profil 1)		
Triage (profil 2)		

DOCUMENT RÉPONSE C

Question Q.29



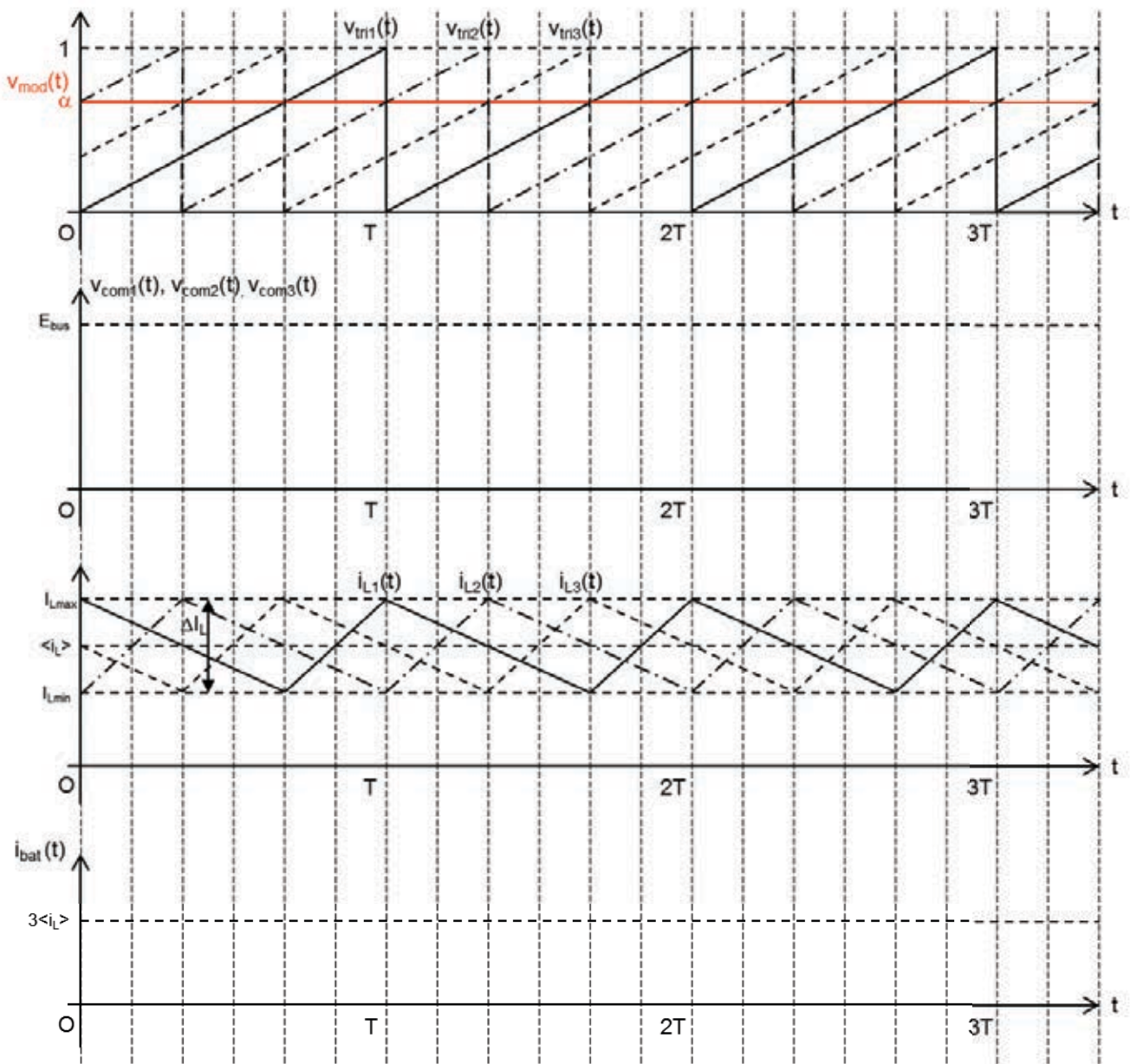
Questions Q.33, Q.34, Q.35

Tableau 8 – Contraintes et pertes sur les interrupteurs pour le hacheur 1 bras

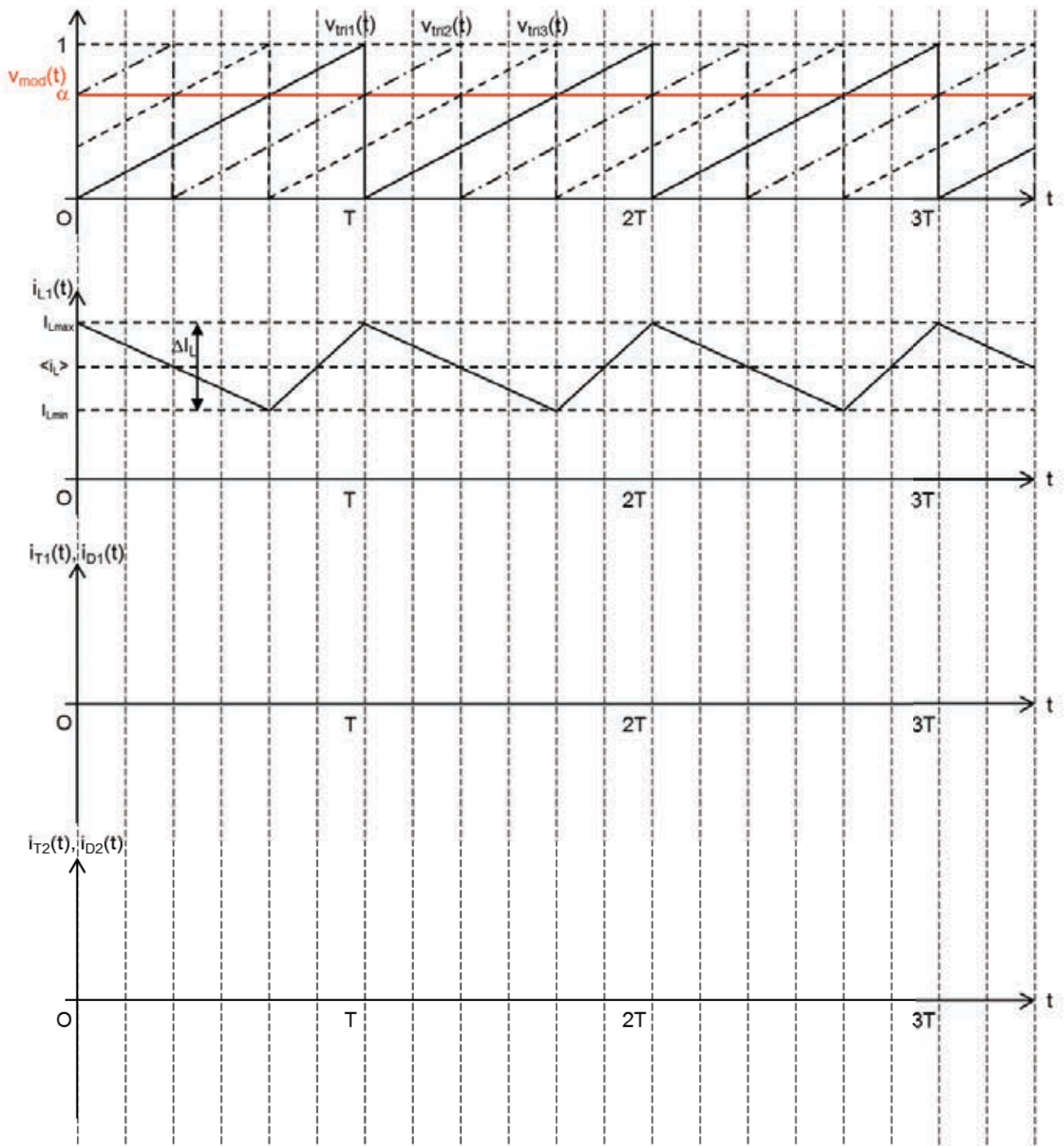
	Tension maximale	Courant moyen	Courant efficace	Courant à conduire à l'amorçage	Courant au blocage	Pertes par conduction	Pertes par commutation
Transistor T_1	-	-	-	-	-		
Diode D_1	540 V	352 A	440 A	567,3 A	532,7 A		
Transistor T_2	540 V	198 A	330 A	532,7 A	567,3 A		
Diode D_2	-	-	-	-	-		

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Questions Q.38, Q.39



Question Q.40



Question Q.42

Tableau 9 – Contraintes et pertes sur les interrupteurs pour le hacheur 3 bras entrelacés

	Tension maximale	Courant moyen	Courant efficace	Courant à conduire à l'amorçage	Courant au blocage	Pertes par conduction	Pertes par commutation
Transistor T_1							
Diode D_1							
Transistor T_2							
Diode D_2							