



HAL
open science

Analyse de la Toyota PRIUS

Daniel Chatroux

► **To cite this version:**

Daniel Chatroux. Analyse de la Toyota PRIUS. EPF2008 Electronique de Puissance du Futur, Jul 2008, Tours, France. cea-03293229

HAL Id: cea-03293229

<https://cea.hal.science/cea-03293229>

Submitted on 20 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse de la Toyota PRIUS

Daniel Chatroux,
CEA LITEN/DTH/LPAC 17, rue des Martyrs, 38504 Grenoble Cedex, France

La Toyota PRIUS est le premier véhicule hybride à large diffusion. L'objet de cette présentation est de détailler le fonctionnement réel du véhicule et des choix de stratégie de conception et d'utilisation qui permettent les gains en consommation tout en assurant une grande durée de vie à la batterie. Dans une seconde phase, l'électronique de puissance qui est rassemblée dans un boîtier unique est détaillée.

I. INTRODUCTION

Une des actions de recherche du laboratoire systèmes pile à combustible du CEA Grenoble consiste en l'obtention d'un retour d'expérience des véhicules électriques et hybrides existant et d'analyser les performances et choix de conception de ces véhicules. Dans le cadre de cette action, une analyse approfondie des études financées par le DOE et menées par l'Oak Ridge National Laboratory [1] a été faite. L'objet de cette présentation est d'indiquer les points techniques principaux de ces travaux d'analyse, qui sont du domaine de l'hybridation et de l'électronique de puissance.

II. FONCTIONNEMENT DE L'HYBRIDATION A DERIVATION DE PUISSANCE UTILISEE SUR LA TOYOTA PRIUS

L'énergie mécanique issue du moteur thermique à essence est transmise à un train épicycloïdal associé à une génératrice électrique. Une partie de l'énergie est transmise directement sous forme mécanique par un des arbres du train épicycloïdal, l'autre partie est transformée en énergie électrique par la génératrice. Cette énergie électrique est utilisée pour alimenter un moteur à fort couple sur l'axe de transmission. Ceci constitue une fonction transmission à variation continue (CVT) contrôlée électriquement, à faibles pertes qui permet une dynamique très rapide.

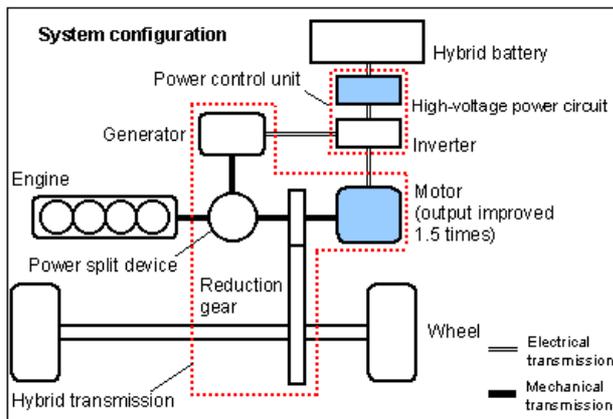


Figure 1

- Les schémas de la figure 2 détaillent le train épicycloïdal :
- Le moteur thermique est relié à l'axe des planètes,
 - La génératrice est sur l'axe du pignon central,
 - L'arbre de sortie est celui de la couronne extérieure.

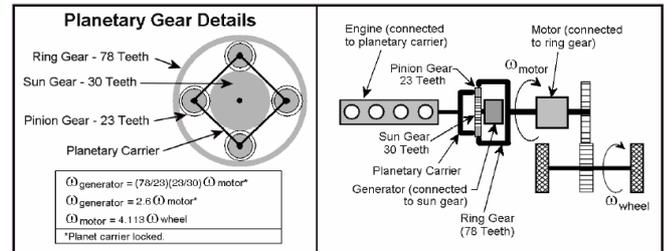


Figure 2

L'addition des deux couples (la partie du couple mécanique issu du moteur thermique et le couple du moteur électrique) est transmise par chaîne au réducteur à pignons, au différentiel, puis aux roues (fig. 3).

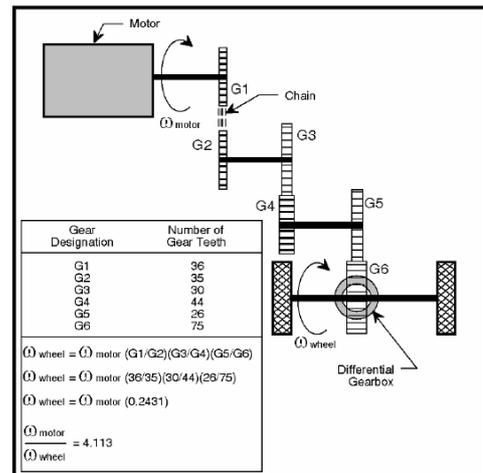


Figure 3

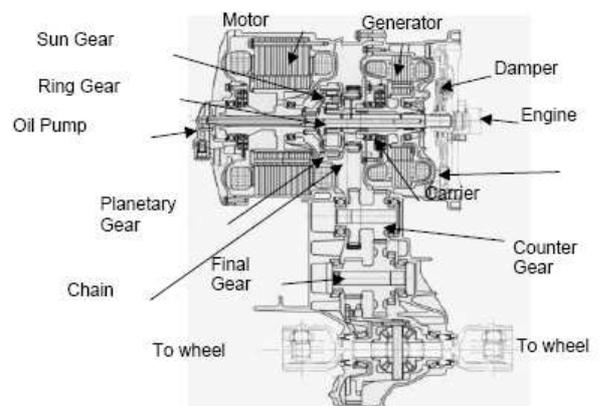


Fig. 1. Motor, generator, and engine of Toyota/Prius hybrid THS II System.

Figure 4

La vue éclatée (fig.4) du moteur électrique, de la génératrice et de la transmission montre la différence de

taille (largeur des rotors et stators) entre les deux machines électriques qui traitent pourtant la même puissance. La génératrice est dimensionnée pour extraire la puissance à couple modéré à haute vitesse. Le moteur électrique est dimensionné pour fournir un couple élevé de 400 Nm, quatre fois supérieur à celui du moteur thermique. Cette valeur de couple élevé permet d'assurer l'accélération à basse vitesse sans avoir recours à une boîte à vitesse.

L'étude du système hybride machines électriques et transmission montre un faible niveau de pertes, qui est inférieur à 1,5 kW sur la plage d'utilisation normale du véhicule. Une part significative des pertes se situe au niveau des transmissions mécaniques.

L'analyse de l'ensemble des informations recueillies sur la Toyota PRIUS met en évidence que le point clé de gain en consommation de la Toyota PRIUS n'est pas lié principalement à l'utilisation de la batterie, mais à l'utilisation d'une transmission continûment variable (CVT) entièrement électrique qui est constituée d'un train épicycloïdal, d'une machine électrique plutôt haute vitesse utilisée principalement en génératrice et d'un moteur électrique à fort couple.

Cette CVT permet de placer à tout instant le moteur thermique optimisé dans les zones de fortes charges à bon rendement.

Contrairement au moteur diesel qui fonctionne en excès d'air et qui n'a donc pas de papillon, le moteur essence fonctionne proche de la stœchiométrie et utilise un papillon pour régler de débit de l'air entrant par laminage. Les phases de roulage où l'accélérateur est peu enfoncé se traduisent par de fortes pertes énergétiques pour aspirer l'air à travers le papillon.

Pour le moteur essence, ce fonctionnement à faible charge (faible couple) se traduit par une chute du rendement qui peut être d'un facteur deux, par exemple, par rapport au rendement théorique.

Sur la PRIUS, la fonction CVT mécanique permet de faire fonctionner le moteur à beaucoup plus faible régime à forte charge (fort couple, papillon fortement ouvert) et de fournir la puissance avec un bien meilleur rendement.

Ce mode de fonctionnement est possible sur un véhicule essence classique en roulant à basse vitesse sur un rapport de vitesse élevé, par contre, le conducteur ne peut pas réaccélérer rapidement. Sur la PRIUS, une réaccélération rapide est possible par le moteur électrique à fort couple.

Le moteur thermique fonctionne selon le cycle d'Atkinson-Miller qui offre un rendement amélioré. Cette technologie nécessite un pilotage des soupapes par décalage angulaire commandé de l'arbre à cames. Ce décalage angulaire commandé de l'arbre à came est aujourd'hui une technologie classique pour les moteurs à essence moderne, même de faible cylindrée (Par exemple, le moteur trois cylindre Toyota de la Peugeot 107, Citroën C1 et Toyota AYGO).

En utilisation routière, le rendement global de la Toyota PRIUS est comparable à celui d'un véhicule diesel à injection directe. Les émissions de CO₂ sont 10 % plus faibles qu'un véhicule diesel équivalent.

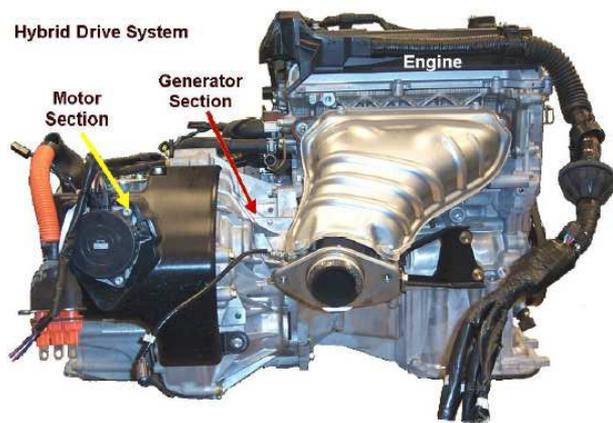


Figure 5

Le bloc moteur - transmission permet de mettre en évidence l'intégration du système. Les fonctions électriques (moteur et générateur électriques) sont intégrées au sein même de la transmission mécanique. Ceci impose une collaboration étroite des différents corps de métiers.

III. UTILISATION DE LA BATTERIE DE LA TOYOTA PRIUS

Sur la partie batterie, les points techniques principaux sont les suivants :

- La batterie de technologie NiMH stocke une énergie maximum de 1,2 kWh (28 éléments de 6 Ah /7,2 V chacun soit 201,6 Volts nominal),
- Pour assurer une durée de vie optimale, l'état de charge moyen de la batterie est d'environ 60%, soit 0,7 kWh et la batterie fonctionne en microcycle.
- Par rapport à l'état de charge moyen, les cycles de charge décharge sont de 5%, dans une fenêtre maximale de 20% aux alentours de 60% d'état de charge. La fenêtre de 20% de variation d'état de charge correspond à l'affichage sur le véhicule. En utilisation le véhicule semble privilégier des cycles maximum de 5%, par contre l'enchaînement rapproché de plusieurs cycles est possible, dans la limite de la fenêtre de 20%.
- La batterie délivre une puissance maximale de 21 kW. A cette puissance le cycle maximum de 20% de variation de l'état de charge (240 Wh) correspondrait à une durée inférieure à une minute.

La batterie est une batterie de puissance (21 kW) utilisée avec de faibles amplitudes de cycle (5% typiquement) dans une fenêtre de 20% autour d'un état de charge moyen de 60% pour augmenter fortement sa durée de vie.

Les points importants relatifs au coût du stockage de l'énergie dans une batterie sont :

- Le stockage d'énergie électrique dans une batterie a un coût d'utilisation qui est **le coût d'acquisition de la batterie** (par rapport à son énergie stockée) **divisé par le nombre de cycles cumulés** que la batterie peut réaliser au cours de sa vie,

- Le coût d'utilisation de la fonction stockage est minimum aujourd'hui pour les batteries au plomb. Il est de l'ordre de 0,5 €/kWh,
- Pour les batteries NiMH, utilisées sur la Toyota PRIUS, ce coût est de l'ordre de 1,5 €/kWh pour une utilisation en cycle profond (durabilité limitée à 1 000 cycles à 80 % de profondeur de décharge et estimation de prix client à 1,5 k€/kWh, soit 6 % du prix véhicule).

Cette estimation de prix client est cohérente avec le prix d'une batterie de Toyota PRIUS en échange standard qui est de 3,2 K€. La batterie a une capacité de 1,2 kWh, ce qui correspond à 2,6 k€/kWh.

- Un litre d'essence correspond à 9 kWh, soit environ 0,6 €/kWh d'énergie mécanique (ou électrique) (avec 1,4 €/l pour du SP95 et un rendement de 30 %).

Si l'on utilise classiquement la batterie (cycles de 80%), le coût de l'énergie stockée est donc très supérieur (1,5 €/kWh) à celui de l'énergie mécanique issue du carburant (0,6 €/kWh), sauf lors des fonctionnements à très faibles vitesses en ville, où le rendement du moteur thermique est très dégradé.

Par contre, l'utilisation de la batterie en micro-cycles, comme sur la Toyota Prius, permet de baisser le coût de l'énergie stockée en acceptant de n'utiliser qu'une faible part de l'énergie disponible.

En effet, pour des micro-cycles de 5 %, une batterie NiMH peut effectuer 100 000 cycles. Le coût de l'énergie stockée se trouve divisé par 5, soit environ 0,3 €/kWh.

La Toyota PRIUS optimise donc l'utilisation de la batterie dans les zones où le coût de l'énergie stockée est acceptable, dans des phases de courtes durées correspondant à la faible quantité d'énergie (240 Wh pour la variation d'état de charge maximale de 20 %) :

- Phases de marche/arrêt à faibles vitesses en ville,
- Récupération d'énergie à la décélération,
- Aide à l'accélération.

Le mode marche arrêt du moteur thermique avec roulage sur l'énergie de la batterie à faible vitesse permet d'avoir une consommation en ville plus faible que sur route, avec un coût global compétitif (carburant + usure batterie). Dans ce mode, la gestion thermique du moteur et du pot catalytique est optimisée pour assurer un très faible niveau de pollution.

Toyota a choisi pour la batterie une technologie mature (NiMH) qui n'offre certes pas les meilleures performances (notamment en énergie massique), mais qui garantit un bon niveau de sécurité.

A l'époque du lancement du véhicule, la démarche commerciale de promotion de la Toyota PRIUS était basée sur la voiture électrique que l'on n'a pas besoin de recharger. La réalité technique était que ce véhicule n'a pas été prévu pour être rechargé et qu'il ne fallait surtout pas rendre rechargeable (plug-in) sous peine d'user prématurément la batterie, avec un coût global beaucoup plus élevé que celui correspondant à l'utilisation du carburant.

Comme pour les véhicules électriques, la viabilité économique d'une version de la Toyota Prius plug-in est liée au développement de batteries à faible coût d'énergie stockée et garantissant une bonne sécurité (NimH ou Li-Ion Phosphate par exemple).

Il est à noter qu'une optimisation d'un facteur deux sur le nombre de cycles et une baisse de coût d'un facteur équivalent dû à l'effet de série (par rapport aux chiffres indiqués dans ce document) amène(ra)it la technologie NiMH à un niveau de coût rendant une PRIUS plug-in compétitive.

Le conditionnement thermique et l'usage de la batterie sont optimisés pour assurer une durée de vie élevée. Comme indiqué précédemment, la batterie n'est utilisée que si elle est strictement indispensable et dans un mode de fonctionnement en microcycle, ce qui n'autorise que des usages de très courtes durées ou distances.

Il apparaît que pour les phases que nous venons de lister et avec le fonctionnement en microcycle, l'utilisation de la batterie est économiquement compétitive (0,3€/KWh) par rapport à l'énergie mécanique issue de l'essence (0,6€/KWh), alors que l'utilisation en cycle complet (batterie rechargeable ou plug-in) ne l'est (peut-être) pas encore (1,5€/KWh).

L'usage en microcycle permet de diminuer d'un facteur cinq le coût d'usage du stockage de l'électricité, pour rendre celui-ci compétitif par rapport à l'énergie issue de l'essence.

IV. ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Entre la première (THS) et la seconde version (THSII) de la Toyota PRIUS, des gains très importants en performances ont été atteints, en conservant les mêmes machines électriques et le même onduleur. Ceci est dû à un changement de l'architecture électrique pour passer à un bus électrique à tension variable.

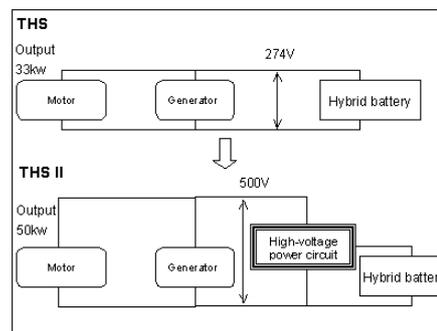


Figure 6

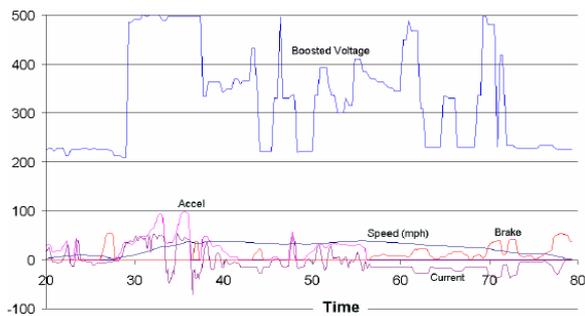


Figure 7

La tension du bus croît avec la vitesse véhicule, et est maximale lors des accélérations fortes ou décélérations.

L'augmentation de la tension a permis de passer de couplage triangle à couplage étoile au niveau de moteur.

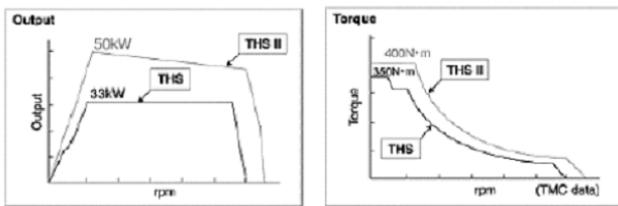


Figure 8

Avec le même moteur câblé différemment et le même onduleur, on offre 400 Nm de couple au lieu de 300 Nm. La puissance maximale disponible passe de 33 KW à 50 KW.

Toute l'électronique de puissance est rassemblée dans un même boîtier qui regroupe les fonctions, onduleur redresseur du générateur, onduleur moteur, convertisseur élévateur de la batterie NiMH de puissance, convertisseur pour le réseau 13,8 Volts, onduleur de climatisation.

L'implantation de différentes fonctions dans le boîtier regroupant l'électronique de puissance est représentée sur la figure 9 :

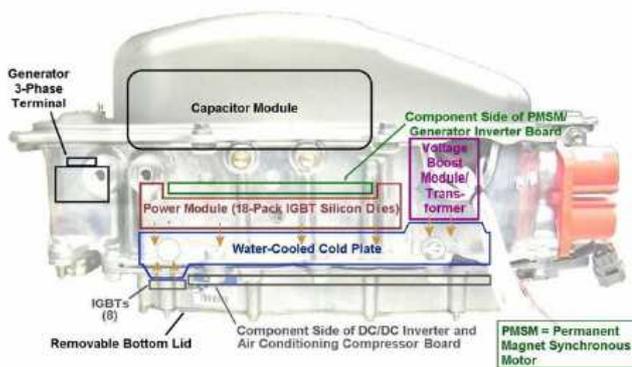


Figure 9

Sur la partie supérieure, la fonction condensateur de découplage du bus continu variant de 200 V à 500 V est réalisée par un condensateur à film plastique parallélépipédique de forte valeur.

La partie supérieure est dédiée à l'onduleur redresseur de la génératrice, à l'onduleur du moteur et à la fonction

abaisseur - élévateur (buck-boost) entre la batterie NiMH de puissance et le bus continu.

La partie inférieure est dédiée au convertisseur entre le bus continu et le réseau batterie 13,8 Volts du véhicule, et à l'onduleur de la climatisation.

Sur la vue de la figure 10, on distingue :

- Le condensateur de découplage du bus continu,
- L'inductance du convertisseur abaisseur -élévateur (buck-boost) de la batterie,
- Les sorties des trois phases du moteur,
- Les entrées des trois phases de la génératrice,
- La connectique haute tension de la batterie.

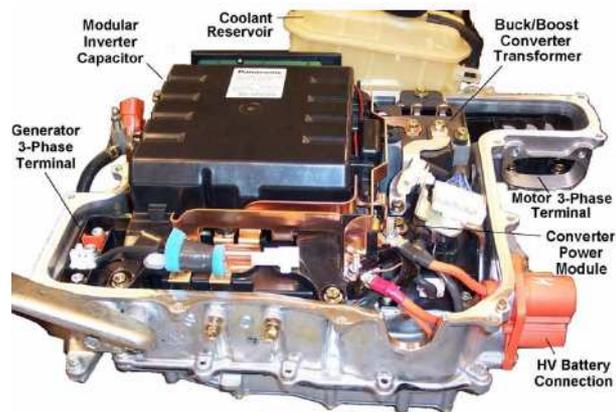


Figure 10

La suppression du condensateur permet de distinguer les circuits de commande. L'Oak Ridge National Laboratory indique que les circuits de pilotage d'IGBT sont de type commande directe, comme ceux de International Rectifier qui étaient présents sur la première version de la PRIUS.

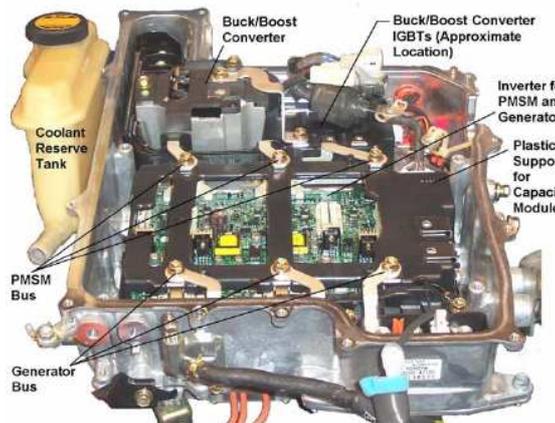


Figure 11

L'inductance du convertisseur Buck-Boost, le module hybride associé et le module hybride principal (IPM : Integrated Power Module) qui regroupe l'onduleur-redresseur de la génératrice ainsi que l'onduleur moteur, sont refroidis sur une plaque à eau, intégrée au boîtier aluminium.

Le module principal est présenté en figure 12

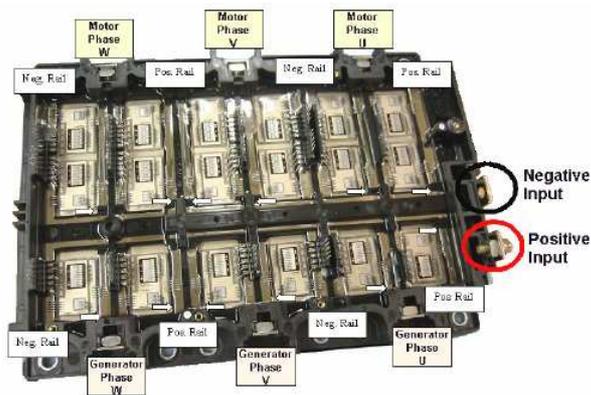


Figure 12

Le module principal regroupe :

- L'onduleur redresseur de la génératrice qui est placé en partie basse de la photo, où chaque interrupteur est constitué d'un IGBT associé à une diode,
- L'onduleur du moteur placé en partie haute de la photo, où chaque interrupteur est constitué de deux IGBTs en parallèles associés à deux diodes.

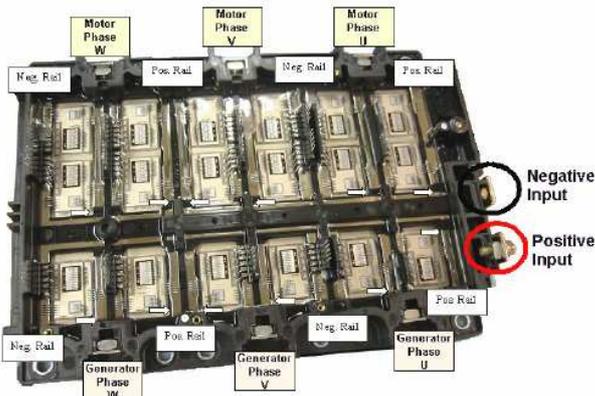


Figure 13

L'onduleur de la génératrice correspond à la partie basse de la photo de la figure ci-dessus. Il est constitué de trois bras, un pour chacune des phases. On a donc six IGBTs.

L'onduleur moteur utilise deux IGBTs et deux diodes par interrupteurs pour commuter les courants nécessaires à assurer le couple du moteur électrique. On a donc douze puces d'IGBTs.

L'onduleur du moteur qui utilise des IGBTs en parallèles est dimensionné pour délivrer les forts courants nécessaires au couple moteur, au démarrage ou lors des accélérations, alors que la génératrice fournira, elle, l'énergie sous haute tension avec des courants réduits.

Les connexions au bus de tension continue s'effectuent sur le côté. Les sorties des trois phases du moteur sont en haut et celles de la génératrice sont en bas.

La partie inférieure du boîtier regroupant l'électronique de puissance correspond au convertisseur DC/DC entre le bus continu et le réseau de bord véhicule 13,8 Volts (de la batterie 12 Volts) et l'onduleur de la climatisation.

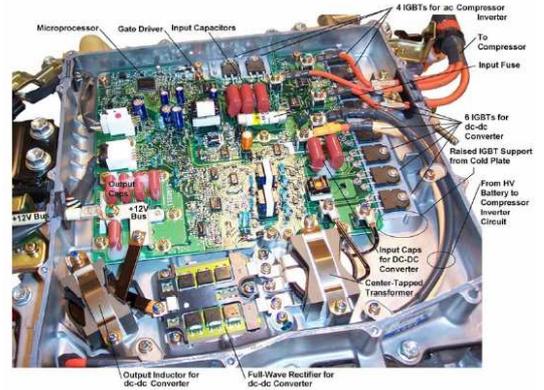


Figure 14

Il y a six IGBTs pour l'onduleur du moteur (trois bras de pont) de la climatisation et quatre IGBTs pour le convertisseur (pont complet).

On observe que le boîtier est utilisé pour la conduction du courant négatif de la sortie 13,8 Volts.

Les diodes de sortie du convertisseur DC/DC sont de type montage en surface et sont placées sur un SMI (Substrat Métallique Isolé) qui permet d'assurer les connexions comme un circuit imprimé, par contre en offrant une fonction de refroidissement.

On note que les condensateurs de découplage sont de type film plastique et non électrochimique. Cela garanti une meilleure stabilité de la capacité dans le temps à haute température.

De même que pour les deux ondulateurs moteur et génératrice, le bras de pont du convertisseur DC/DC entre la batterie NiMH de puissance le bus continu sous tension variable (200V-500V) est réalisé avec un module de puissance intégré (IPM).

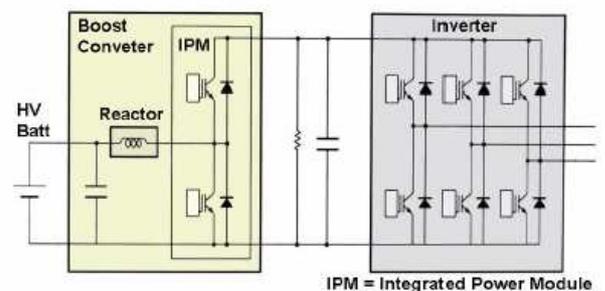


Figure 15

Les photos (fig.16) indiquent les différents niveaux dans le module.

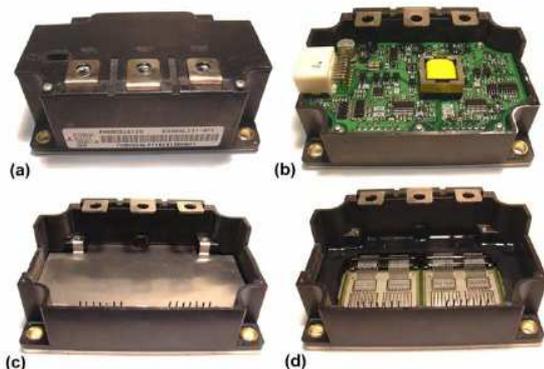


Figure 16

Il est à noter que le convertisseur abaisseur - élévateur de la batterie (buck-boost converter) ne fonctionne que pendant des temps courts, puisque le temps de décharge autorisé pour la batterie correspond à une durée inférieure à la minute pour un fonctionnement à pleine puissance de 20 KW. Ceci amène à un dimensionnement particulier, beaucoup plus compact que le même convertisseur fonctionnant en continu qui aura en permanence à évacuer des pertes thermiques.

Le fait de rassembler au sein d'un même boîtier tous les convertisseurs et onduleurs du véhicule permet un gain de volume important, en supprimant tous les filtrages en entrée et en sortie et les interfaces de communication qui auraient été nécessaires sur des boîtiers différents, en mutualisant les fonctions condensateurs de découplage, et en mutualisant la plaque à eau de refroidissement.

V. CONCLUSION

Une des actions de recherche du laboratoire systèmes pile à combustible du CEA Grenoble consiste en l'obtention d'un retour d'expérience des véhicules électriques et hybrides existant et d'analyser les performances et choix de conception de ces véhicules. Dans le cadre de cette action, une analyse approfondie de documents émis principalement par l'Oak Ridge National Laboratory [1] a été faite.

Le point clé de gain en consommation de la Toyota PRIUS n'est pas lié principalement à l'utilisation de la batterie, mais à l'utilisation d'une transmission continûment variable (CVT) entièrement électrique qui est constituée d'un train épicycloïdal, d'une machine électrique plutôt haute vitesse utilisée principalement en génératrice et d'un moteur électrique à fort couple.

Cette CVT permet de placer à tout instant le moteur thermique optimisé dans les zones de fortes charges (fort couple) à bon rendement. En utilisation routière, le rendement global de la Toyota PRIUS est comparable à celui d'un véhicule diesel à injection directe.

La batterie n'est utilisée que si elle est strictement indispensable et dans un mode de fonctionnement en microcycle, ce qui n'autorise que des usages de très courtes durées ou distances tels que dans les cas suivants :

- phases de marche/arrêt à faible vitesse en ville,

- récupération d'énergie à la décélération,
- aide à l'accélération.

Du fait de la faible plage de cyclage, l'énergie n'est pas récupérée en descente. Dans les côtes, la batterie n'assiste pas le moteur thermique.

Cet usage en microcycle de 5% (dans une fenêtre de 20% aux alentours de 60% d'état de charge) permet de diminuer d'un facteur cinq le coût d'usage du stockage de l'électricité et de rendre celui-ci compétitif par rapport à l'énergie issue de l'essence.

En ville, le roulage à faible vitesse en utilisant l'énergie de la batterie en microcycle, puis recharge rapide par le moteur thermique utilisé dans les zones à bon rendement permet d'obtenir une consommation en ville inférieure à celle sur route, avec un coût d'usage compétitif (carburant + usure batterie). Ce point est un avantage important de la technologie.

Dans les phases de marche arrêt du moteur thermique, la gestion thermique du moteur et du pot catalytique est très bien maîtrisée, ce qui permet d'obtenir de très faible niveau de pollution.

Toute l'électronique de puissance est rassemblée dans un même boîtier qui regroupe les fonctions, onduleur redresseur du générateur, onduleur moteur, convertisseur élévateur de la batterie NiMH de puissance, convertisseur pour le réseau 13,8 Volts, onduleur de climatisation.

Le fait de rassembler au sein d'un même boîtier tous les convertisseurs et onduleurs du véhicule permet un gain de volume important, en supprimant tous les filtrages en entrée et en sortie et les interfaces de communication qui auraient été nécessaires sur des boîtiers différents, en mutualisant les fonctions condensateurs de découplage, et en mutualisant la plaque à eau de refroidissement.

VI. RÉFÉRENCES

- [1] Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System »

<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/890029-WlfqPO/890029.PDF>