

Curs 2

Analiza sistemului electric al vehiculelor electrice- hibride

Sistemul complet a unui vehicul este proiectat pentru a dezvolta suficientă putere de propulsie la nivelul roților în așa fel încât acesta să respecte o serie de performanțe impuse de standardele în vigoare. Evident, aceste repere sunt fixate de cerințele motoarelor cu combustie internă existente pe piață.

Așadar sistemul de propulsie trebuie să fie dimensionat funcție de masa vehiculului, încărcarea și performanțele impuse. Sistemului de propulsie al vehiculului se dimensionează o accelerație corespunzătoare legii lui Newton $F=ma$. Accelerații acceptabile pentru vehicule sunt în gama 0.15-0.3g, cu alte cuvinte la un autovehicul cu masa de 1500kg, sistemul de propulsie trebuie să dezvolte o forță de 2205-4410N. Accelerații agresive care ajung în zona 0,6g, necesită o forță de 8820N sau chiar mai mare. Limita forței de tracțiune este fixată de masa vehiculului și de forța normală de contact a pneurilor cu asfaltul. Coeficientul de frecare uzual al pneurilor de cauciuc cu suprafața de rulare este 0,85. Desigur acest coeficient este în caz ideal, în realitate valoarea lui fiind mai mică, motivată de existența mizeriei, a apei, petelor de ulei etc. pe suprafața de rulare.

Vehiculele cu destinație pentru transport de pasageri necesită un raport putere de vârf pe masă de 10kW/125kg pentru accelerare corectă și în concludență cu specificațiile impuse. Variantele sport sau de lux ale vehiculelor tind să creacă acest raport la 13kW/125kg.

În acest capitol se vor discuta în detaliu directive de dimensionare a sistemului de propulsie cu componente motor/generator, electronica de putere și unități de stocare a energiei electrice.

Având în vedere faptul că acest tratat se face apel la atenția inginerilor electro, nu se vor analiza sau dezbate subiectele de mecanica transmisiei, sau a motorului cu combustie internă, acestea fiind considerate ca atare. Întreaga discuție se referă la ansamblurile electrice ale vehiculului.

3.1. Analiza și dimensionarea motorului electric de propulsie

Un motor electric reprezintă elementul de esență al propulsiei hibride, indiferent dacă motorul de combustie este diesel sau pe benzină sau chiar complet electric.

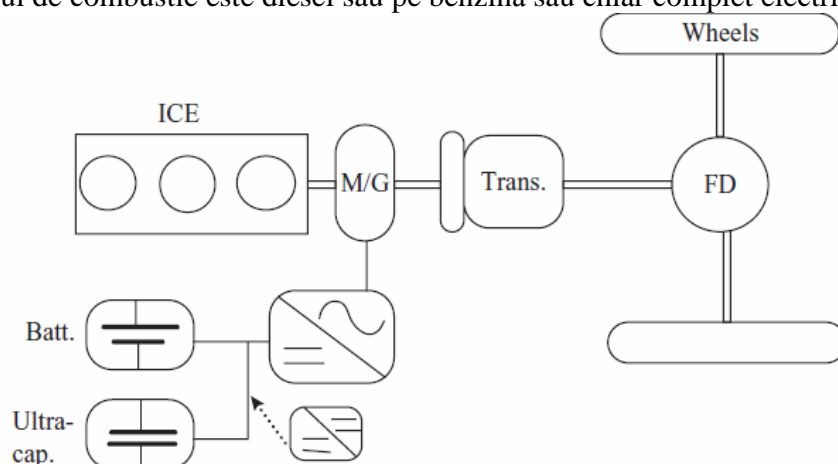


Fig. 3.1 Sistemul complet de propulsie al unui vehicul hibrid

În fig. 3.1 este reprezentată schematic unitatea de propulsie a unui vehicul hibrid în structură multiconvertor. Acest sistem poate fi modificat prin inserarea unui convertor de interfațare tip ridicător de tensiune și o unitate de ultracondensatori pentru performanțe maxime când sunt nu sunt utilizate baterii tip non-alcaline. De exemplu combinarea unei baterii tip acid-plumb și ultracapacitori reprezintă o creștere a performanțelor energetice a întregului sistem. În acest caz, greutatea și costul întregului sistem de stocare a energiei electrice sunt reduse consistent. Dacă se utilizează un sistem combinat de baterii alcaline și ultracondensatori performanțele globale sunt foarte puțin îmbunătățite [1].

Grupul motor-generator, M/G, este dimensionat în așa fel încât viteza maximă la punctul de transmisie să fie sub 12000 rpm, limitarea fiind realizată din intermediul unității de control al motorului. Limitarea este impusă pentru că, în timpul croazierei este foarte posibil prin selecția greșită a treptei de viteză să se realizeze o supraturare a grupului propulsor.

Cele mai multe grupuri propulsoare de acest gen sunt limitate la sub 12000 rpm și din motive de natura mecanică și tehnică cum ar fi: limitele de rulare ale lagărelor, probleme în detecția poziției rotorului la așa viteză mare respectiv intrarea motoarelor în domenii de vibrație care depășesc rezistența mecanică a materialelor din care ele sunt realizate. Puterea și cuplul dezvoltate de M/G sunt dictate de ceea ce numim *fracțiune electrică* (FE) definită ca raport al puterii de vârf și al puterii totale. Această FE la automobilele uzuale este în domeniul 0,1-0,4. Peste 0,4 capacitatea de stocare a energiei pe vehicul trebuie crescută pentru a-l acomoda la operarea în regim pur electric, altfel, de exemplu în cazul unui vânt frontal puternic, sistemul global de propulsie nu se va putea comporta corect, lăsând motorul cu combustie internă nesuplimentat cu puterea motorului electric.

Pentru fiecare motor electric sunt ridicate familii de variație a cuplului și puterii, definind capacitatea lui de a opera în sistem hibrid. Este foarte important de înțeles faptul că aceste curbe descriu limitele motorului și totodată limitele unității hibride.

În fig. 3.2 este prezentată o caracteristică de variație cuplu/viteză a unui motor electric oarecare. Puterea de ieșire intermitentă sau de vârf este de obicei $4/3$ până la $5/3$ din puterea continuă sau nominală. Este important ca această caracteristică să fie corect analizată și înțeleasă pentru a putea conștientiza limitele maxime de operare ale motorului. Puterea de vârf reprezintă 250% din cea continuă și aceasta devine specificație cheie atunci când se realizează proiectarea motorului. Motoarele uzuale au în regim continuu de operare limitări termice în domeniul 40-60°C. Creșteri ale temperaturii peste acestea necesită o atenție deosebită în ceea ce privește sistemul de răcire care asigură în vederea nedistrugerii motorului sau reduce mult fenomenul de *oboseală* prematură a izolației conductoarelor. În trecut de exemplu, motoarele de inducție erau proiectate în așa fel ca ele să reziste la supraîncărcări care durau 10s până la 30s fără a avea salturi termice de peste 180°C la nivelul statorului.

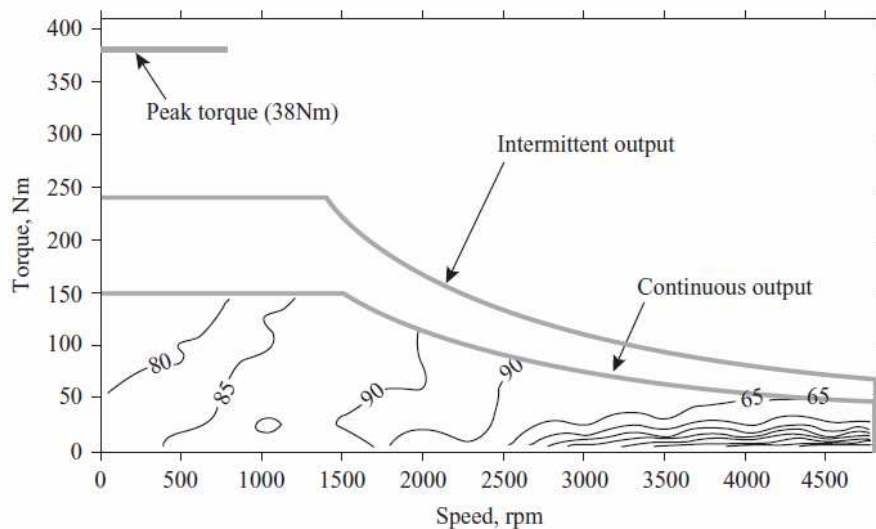


Fig. 3.2 Variația puterii funcție de viteză a unui motor electric

Analizând mai atent fig. 3.2 se poate observa că există o viteză limită până la care cuplul este constant, indiferent că discutăm de valoare maximă, intermitentă sau continuă. În această zonă operațională, convertorul electronic are suficientă tensiune absorbită din sistemul de stocare (baterii sau ultracondensatori) pentru a putea injecta curenții necesari în înfășurările mașinii. Atunci când viteza mașinii crește peste o anumită valoare, care definește totodată punctele de cădere a cuplului, practic, tensiunea de alimentare din sistemul de stocare nu mai este suficientă pentru a injecta puterea cerută. În aceste momente practic electronica de putere lucrează în regim de *supramodulare*. Chiar și în aceste condiții, mașina poate funcționa și ea va livra putere constantă. Urmărind variația caracteristicilor din fig. 3.2 se poate observa, că în cazul în care viteza este crescută și mai mult, apare un al doilea punct de cădere a cuplului, dar de această dată și a vitezei. Intrând în acest domeniu, mașina electrică rămâne inutilizabilă, fiind foarte instabilă din toate punctele de vedere.

La această a doua cădere a caracteristicii, un proces diferit domină comportamentul mașinii. La prima cădere practic discutăm despre *supramodularea* convertorului, cădere care era dependentă de tensiunea de alimentare a mașinii fiind practic o zonă de slăbire de flux a mașinii pentru a crește turația ei, acest proces poate fi foarte bine controlat și utilizat. Practic la slăbire de flux, tensiunea electromotoare produsă de mașină este redusă în așa fel încât curenții care sunt injectați în mașină să se păstreze la valoarea nominală.

Cea de a doua cădere este caracterizată de destabilizarea mașinii și în care tensiunea electromotoare crește mult, curenții scad cu inversul vitezei iar cuplul scade cu $1/\text{turația}^2$ ceea ce duce practic la oprirea mașinii.

În cazul mașinii cu magneți permanenți, cea de a doua cădere apare atunci când curenții injectați nu mai pot fi menținuți la valoare constantă în timpul procesului de slăbire de flux.

Acest proces este pregnant la mașinile cu magneți fixați la exterior. La cele cu magneți îngropați cel de al doilea punct de cădere al caracteristicii apare mult mai târziu în procesul de slăbire de flux atunci când curentul de pe axa d a mașinii nu mai este

capabil să reducă tensiunea electromotoare a mașinii, cu alte cuvinte când curentul a atins valoarea nominală și acesta nu mai poate fi crescut. Astfel nu mai rămâne nicio componentă de curent disponibilă pentru producția de cuplu.

Pentru mașinile sincrone cu reluctanță variabilă, sau pentru mașinile cu reluctanță comutată electronic, această a doua cădere este aproximativ în același regim ca pentru mașinile mai sus menționate.

Se poate afirma în acest caz că operarea mașinii electrice de propulsie la putere de vârf nu este aplicabilă în cazul vehiculelor hibride. Cu toate acestea, mașinile construite în acest scop sunt proiectate pentru a funcționa foarte aproape de puterea de vârf în cazuri intermitente de 10s până la 30s. Există o a doua restricție în acest aspect, materializată de electronica de putere. Aceasta are limitări serioase din punct de vedere al supraîncălzirii.

Componentele semiconductoare au o constantă termică de timp de ordinul milisecundelor, astfel ca o supraîncărcare de 10s a mașinii va reprezenta regimul staționar al electronicii de putere. Ca atare, curba prezentată în fig. 3.2 reprezintă mai mult limitarea electronicii de putere decât a mașinii electrice.

Următoarele afirmații pot fi reținute pentru a descrie concret limitările pe care o caracteristica asemenea celei din fig.3.2 o descrie:

Operare continuă: Este regimul în care unitatea de propulsie poate fi operată indiferent de durata de timp. Aici, temperatura motorului este la valoarea maximă acceptabilă sau sub această valoare. Asemenea și electronica de putere trebuie să aibă temperatura maxim admisibilă iar parametrii energetici ai ei, ca stres electric, să fie până în 50% din valorile de catalog. De exemplu, tensiunea maximă de alimentare să nu depășească 50% din cea nominală a semiconductorului.

Supraîncărcare intermitentă: este permisă pentru perioade scurte, sub 30s, timp în care se răspunde unor modificări rapide ale cuplului, treceri dintr-o treaptă de viteze în alta sau atunci când se solicită din partea motorului cu combustie internă un surplus de putere de la motorul electric.

Supraîncărcare de vârf: este domeniul la care mașina electrică ar putea să răspundă însă electronica de putere nu. Au fost o serie de încercări de a redefini această condiție de supraîncărcare de vârf care descriu regimuri tranzitorii foarte scurte și vehiculează puteri foarte mari. În aceste condiții, electronica de putere trebuie redimensionată pentru a suporta variații mari de curent. Cu alte cuvinte electronica trebuie să fie dimensionată ca acolo unde pentru motor este valoare de vârf de putere, electronica să fie la valoare nominală, ceea ce este dezavantajos din punct de vedere financiar.

Managementul termic al echipamentelor: reprezintă totalitatea ansamblelor implicate în răcirea motorului de propulsie și al electronicii de putere. Aceste ansamble sunt materializate prin pompe, radiatoare și ventilatoare. Având în vedere că datorită motorului de combustie există deja un sistem de răcire al autovehiculului, grupul electric va avea o răcire separată. Motorul electric trebuie răcit sub 115°C iar electronica de putere sub 65°C. Având această limitare termică, la nivelul jonțiunii, variațiile de temperatură trebuie menținute sub 40°C crescând astfel durata de viață a echipamentelor la peste 6000 de ore.

În fig. 3.2 în regim de operare continuă sunt ridicate regiuni de randament. Grupul M/G pentru vehicule hibride este proiectat diferit față de vehiculele pur electrice. Pentru acestea, grupul M/G este proiectat pentru a avea eficiență maximă în zona de

cuplu constant și viteză mai mică scăzând înspre zona de putere constantă. Mașinile electrice industriale sunt dimensionate pentru a avea eficiență maximă în apropiere de zona primei căderi a caracteristicii, adică acolo unde cuplul este încă constant și turația este mare. Pe de altă parte pentru variantele hibride nu există un punct anume de operare nominală, cuplate fiind cu motoare cu combustie internă. Se poate discuta aici de cicluri de operare, ca atare ar fi ideal ca eficiența maximă să cuprindă o arie cât mai vastă, de la cuplu constant până la zona de putere constantă.

3.1.1. Raportul de putere/viteza constant

În subcapitolul precedent s-a discutat despre caracteristica de variație a puterii cu viteza mașinii electrice subliniind faptul că, pentru vehicule hibride, operarea la putere de vârf este restricționată de electronica de putere care controlează mașina electrică.

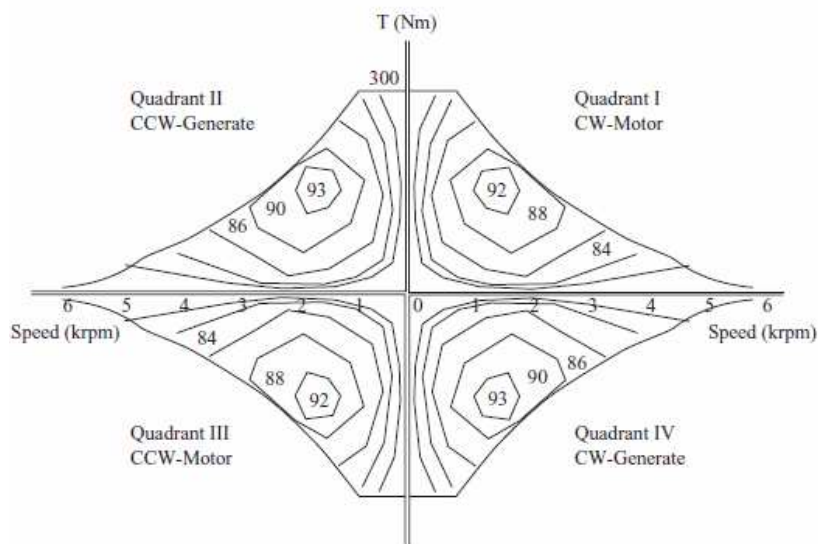


Fig. 3.3 Funcționarea M/G în toate regiunile operaționale

În fig. 3.3 este ridicată caracteristica de operare a mașinii electrice pentru propulsie atât în regim de motor, în cadranele 1 și 3 cât și în regim de generator, în cadranele 2 și 4. Trecerea dintr-un cadran în altul este reprezentată de modificarea semnului turației sau a cuplului. Când ambele sunt negative sau ambele pozitive, mașina va opera în regim de motor. Dacă semnul celor două entități diferă, mașina va fi operată în regim de generator. Trebuie să remarcăm faptul că, vorbind despre vehicule hibride, motorul electric de propulsie este controlat de către un convertor electronic de putere, așa cum s-a mai menționat. Controlul acestui convertor permite trecerea aceasta din regim de motor în regim de generator al mașinii.

Dacă luăm un exemplu concret, să presupunem că la un moment dat, mașina electrică operează în regim de motor, la o viteză de 2500rpm și dezvoltă un cuplu de 150Nm iar ca scenariu considerăm că soferul s-a angajat într-o depășire agresivă. Imediat ce a schimbat banda, realizează că trebuie să renunțe la tentativa de a depăși și comandă prin eliberarea pedalei de accelerație, reducerea vitezei și revenirea pe banda normală de circulație. În acest moment, mașina electrică primește comandă de producere de cuplu

negativ, sa zicem 80Nm ceea ce se traduce direct prin recalcularea unghiului de comandă al curenților în așa fel încât aceștia să ajungă în opoziție de fază cu tensiunea din mașină. Astfel, mașina intră în regim de frână ca atare, generator. Trecerea de la un cuplu pozitiv la unul negativ, ca durată de timp, este marcată de tipul controlului convertorului electronic. Aceasta poate să varieze de la 30ms la 100ms, depinzând de gabaritul mașinii și de metoda de control aleasă. De obicei, metodele de control de cuplu sunt foarte rapide, pe când metoda de control vectorial este ceva mai lentă. Oricum, având în vedere că mecanic există cuplaj cu motorul cu combustie internă, răspunsul sistemului electronic este de câteva zeci de ori mai rapid decât al celui mecanic. Fenomenul este identic și atunci când se realizează un mers cu spatele al vehiculului și se execută o frânare electrică.

Principalele tipuri de mașini electrice care sunt utilizate în vehicule electrice (VE) și hibride (VEH) sunt prezentate în fig. 3.4.

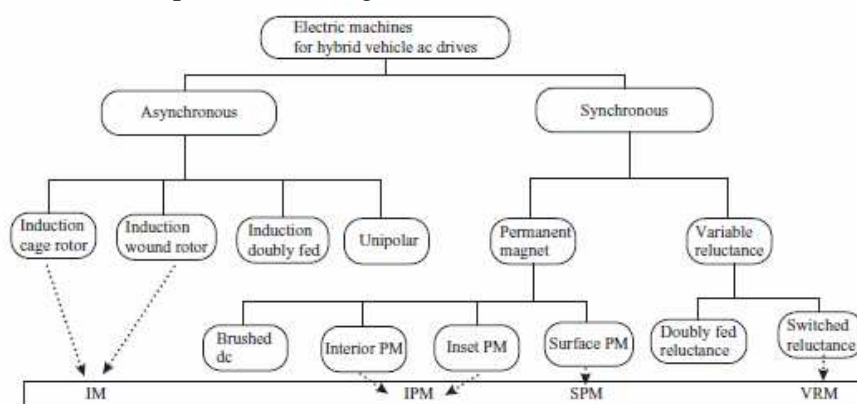


Fig. 3.4. Clasificarea mașinilor electrice utilizate în VE și VEH

Două clase principale de mașini electrice sunt implicate în producția de VEH cele sincrone și cele asincrone. Cele mai utilizate sunt mașinile sincrone, datorită faptului că strategia de control este simplificată nefiind nevoie de calculul alunecării respectiv, la cele cu magneți permanenți, nefiind nevoie de alimentare exterioară a circuitului de excitație. Magnetul permanent este o sursă internă de energie ceea ce face din mașina sincrona un adversar serios la orice alt tip de mașină electrică lipsită de magnet permanent.

3.2. Analiza principală a electronicii de putere

Întreaga putere electrică care este vehiculată spre sau dinspre unitatea de propulsie M/G trece prin electronica de putere. În acest subcapitol vom detalia aspectele principale privind dimensionarea electronicii de putere pentru ca aceasta să conlucreze cu mașina de propulsie având în vedere importanța potrivirii convertorului electronic cu cerințele mașinii de propulsie. Este bine de amintit că, un aspect important al electronicii de putere este prețul de implementare, care, cu cât puterea este mai mare, crește. În acest caz este relevant ca dimensionarea să se facă în acord cu puterile vehiculate, în același timp considerând o marjă de supraputere pentru cazuri excepționale.

Fig. 3.5 prezintă schematic sistemul electronic pentru controlul unei mașini electrice de curent alternativ, ca unitate de propulsie utilizată într-un vehicul hibrid.

Alimentarea acestui sistem se realizează fie din bateriile vehiculului, fie din ultracondensatorii ca sursă de stocare a energiei. Tensiunea continuă a unității de stocare este transformată în tensiune trifazată de frecvență și amplitudine variabilă, precalculeată de către unitatea de control, de către convertorul electronic, format din șase tranzistoare de putere și șase diode de fuga. Acest punct este un prim reper de transformare a energiei electrice continue în energie electrică de parametri alternativi. La rândul ei, mașina electrică face cea de a doua conversie, transformând energia de la ieșirea convertorului în energie mecanică materializată prin cuplu și viteză la nivelul arborelui unității de transmisie mecanică.

Dacă este să facem o similitudine, convertorul electronic adaptează puterea absorbită din baterie la necesarul cerut de motorul electric, precum o cutie de viteze adaptează puterea motorului cu combustie internă la necesarul cerut de către traseul vehiculului.

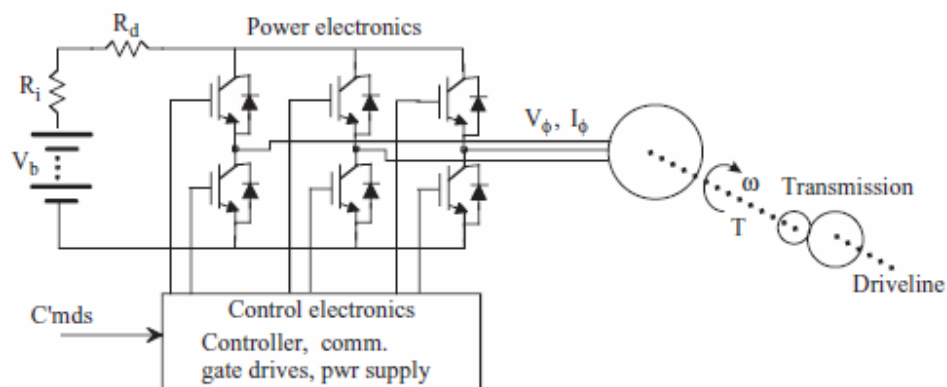


Fig. 3.5. Schema de principiu a convertorului electronic pentru un VH cu mașina electrică de curent alternativ

Capacitatea convertorului electronic de a procesa puterea cerută este legată direct de nivelul tensiunii continue în avalul lui, adică la nivelul grupurilor de stocare a energiei. Tensiune mai mare înseamnă o putere transferată mai mare utilizând aceleași secțiuni a conductoarelor și aceleași volum de element semiconductor. În fig. 3.6 prezintă capacitatea convertoarelor de a transfera putere funcție de tensiunea lor de alimentare respectiv secțiunea conductoarelor necesară pentru curenți până la 250A. Se poate observa în fig 3.6.a că pentru o tensiune de alimentare de 42V se poate atinge puterea de 10kW pentru un sistem hibrid. Este clar din această figură că, pentru un vehicul fie el electric sau hibrid, este recomandată o tensiune de alimentare a convertorului de peste 150V pentru a atinge repere de putere ridicată. Profitând de avansul electronicii de putere și a componentelor semiconductoare în ultimii ani, se pot contura ample motive pentru a impune tensiuni de alimentare ale convertoarelor de putere la peste 300V, motivând și prin faptul că unitățile de stocare nu necesită complexitate ridicată sau management energetic dificil.

În fig. 3.6.b se indică faptul că cele mai recente sisteme de propulsie hibridă sunt bazate pe curenți în jurul a 100A, excepție făcând câteva modele cum ar fi Ford Escape (200A) și altele. La tensiuni de alimentare peste 600V este necesar ca să se ia condiții suplimentare de precauție în ceea ce privește izolațiile față de masă respectiv trebuie

considerat că elementele tip contactor care asigură decuplarea galvanică a bateriilor de la sistemul electronic devin foarte mari ca volum.

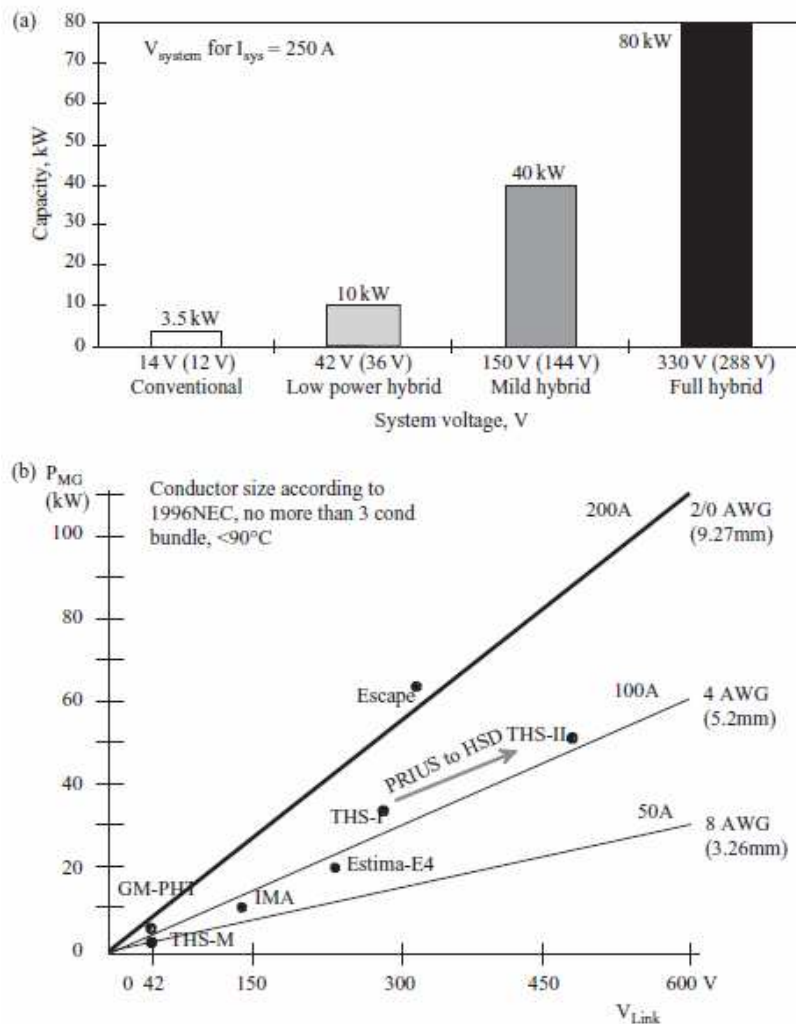


Fig. 3.6. Capacitatea de transfer de putere funcție de tensiune (a) și secțiunea impusă pentru conductoare

3.2.1. Integrarea electronicii de putere la nivelul VEH

Miniaturizarea electronicii de putere este cerută acolo unde apar restricții severe de spațiu cum ar fi în domeniul automobilelor, a aparatelor de zbor, respectiv în industria roboților. Ca răspuns la această cerere, dezvoltarea electronicii a forțat mereu tendința de a crește continuu densitatea de putere a pieselor electronice. În ultimii 20 de ani s-au realizat salturi remarcabile în acest domeniu, ceea ce a permis extinderea electronicii pe toate domeniile de aplicabilitate.

Așa cum s-a prezentat și în capitolul anterior, cu cât este mai mare tensiunea de alimentare a convertoarelor și implicit a motorului electric de tranziție la nivelul unui automobil, cu atât crește randamentul și performanțele acestuia. Această rețea internă de

tensiune mare include cel puțin o unitate de stocare a energiei și un convertor electronic. Cele mai cunoscute variante de vehicule electrice sunt compuse din mai multe subsisteme electronice interconectate la nivelul de tensiune continuă înalta prin intermediul unor convertoare CC/CC, care le asigură tensiunea de alimentare dorită (de exemplu 12V sau 14V). Alte element foarte des întâlnit este invertorul CC/CA care alimentează compresorul de climă, apoi un convertor de putere tip CC/CC care alimentează mașina de tracțiune sau chiar un convertor CA/DC uni sau bidirecțional pentru cuplarea vehiculului la rețeaua publică în vederea alimentării cu energie electrică (vezi fig. 3.7).

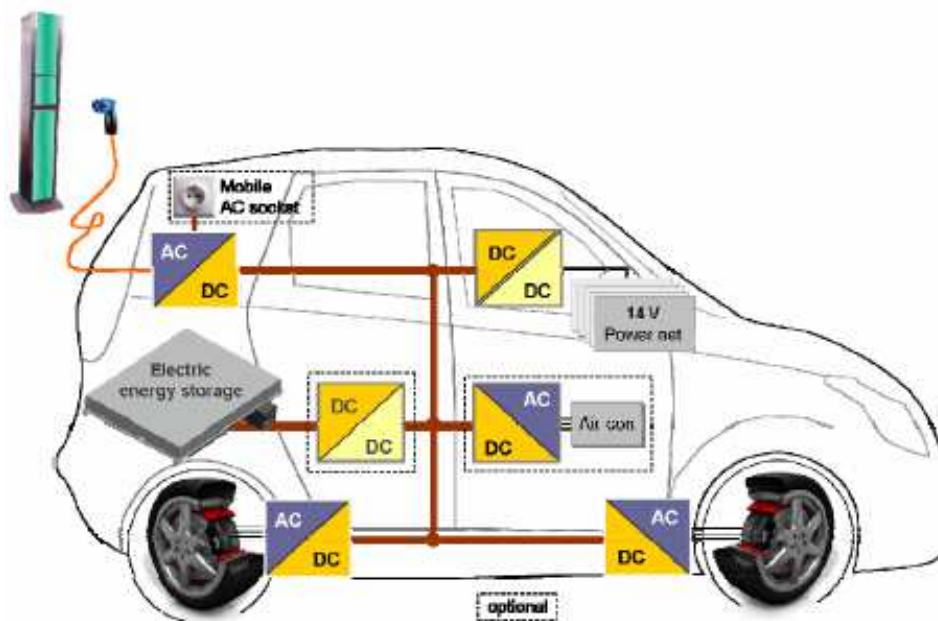


Fig. 3.7. Structura de bază a unui vehicul electric

Zona de tensiune ridicată în vehicul trebuie să fie foarte bine izolată față de cea de joasă tensiune, și evident față de șasiul autovehiculului. Exploatarea tensiunii ridicate obligă la utilizarea unor cabluri cu clase de izolație ridicate și conectori proiectați pentru aceste tensiuni.

3.2.2 Distribuția sistemului

Având în vedere faptul că un VE sau VEH este compus dintr-un număr mare de elemente, așa cum deja s-a specificat, apare o întrebare: cum trebuie să aranjăm în spațiul vehiculului aceste componente și cum trebuie să le integrăm la nivelul vehiculului. Dezvoltarea industriei de VE a adus multe răspunsuri la această întrebare. De exemplu, cea mai comună soluție pentru electronica de putere este amplasarea tuturor componentelor ei, într-o singură cutie, la nivelul central al șasiului autovehiculului. Aparent avantajele sunt multe la o asemenea amplasare în spațiu, în ceea ce privește răcirea ei, accesul în caz de defect, etc. Totuși aceasta nu este o soluție foarte bună. Motivele sunt multe. Cel mai important este faptul că e necesară implementarea unei izolații foarte riguroase la nivelul automobilului având în vedere că, amplasamentul

electronicii de înaltă tensiune și al pasagerilor se face în același loc, și anume în habitacul. Mai mult, emisiile de unde electromagnetice, care pot dăuna serios, în special persoanelor cu boli cardiace, trebuie eliminate.

O soluție alternativă, care înlătură toate dezavantajele mai sus menționate este prezentată în fig. 3.8.

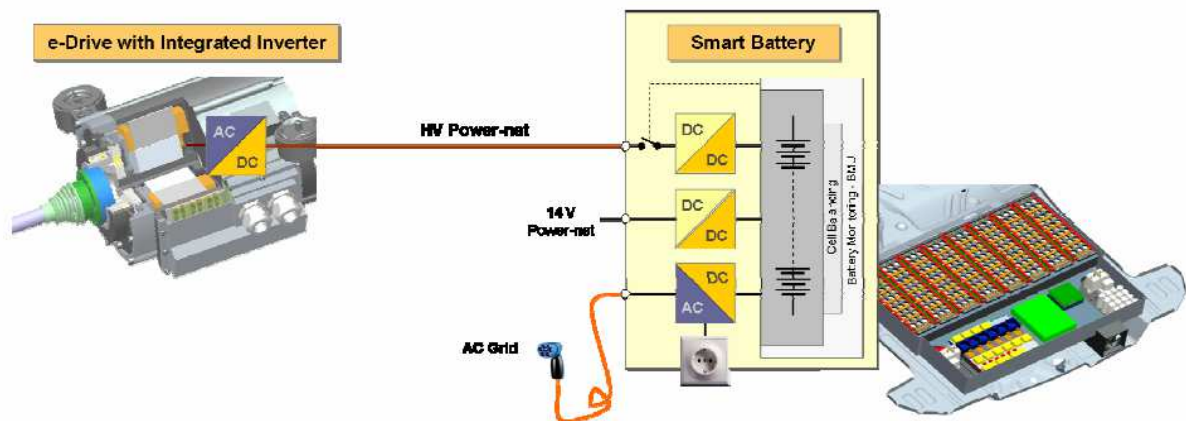


Fig.3.8 Soluție pentru integrarea electronicii de putere direct în motorul de tracțiune

Această soluție este motivată de ideea că amplasarea convertorului de putere la nivelul motorului electric de tracțiune, chiar integrarea acestuia în el, minimizează mult costurile de implementare, lungimea cablurilor și duce departe de pasageri pericolele mai sus detaliate.

Restul convertoarelor, care folosesc pentru încărcarea bateriilor, pentru conectarea la rețea, pentru reglajul diferitelor nivele de tensiune, devin parte componentă a bateriei, aceasta devenind astfel, *baterie inteligentă* (în engleză conceptul de „*smart battery*”).

Aceasta duce și la reducerea cablurilor de legătură între diferite unități, ceea ce face ca emisiile de unde electromagnetice să se reducă mult, cablurile funcționând ca antene emițătoare pentru acest fenomen. Aceasta nu doar că reduce prețul cablului utilizat, dar reduce și costurile implicate pentru izolarea împotriva undelor electromagnetice. Este evident că aceste unde nu se pot reduce la zero, dar prin structura mai sus prezentată, se poate reduce la o cota minimă acceptabilă de corpul uman.

3.2.3. Integrarea de sistem

Cele mai serioase provocări care apar la integrarea „inteligentă” a electronicii de putere la nivelul vehiculului apar datorită faptului că spațiul alocat și disponibil într-un autovehicul este redus, cu forme complexe și adesea contaminat de alți agenți (stres termic sau mecanic, etc.). Așadar, un sistem mecatronic integrat, nu este suficient să aibă densitatea de putere mai mare. Soluții inovative trebuie dezvoltate pentru a produce noi structuri și noi posibilități de interconectare a componentelor, noi metode de răcire care permit integrarea convertorului în spațiul alocat, fiabilitate ridicată și costuri de implementare reduse. O atenție serioasă trebuie acordată în acest caz la nivelul

componentelor pasive care au volum mare, cum ar fi condensatorii de filtraj de pe nivelul de tensiune continuă, filtrele inductive respectiv filtrele de emisii electromagnetice. Ca atare, noile direcții sunt impuse de reducerea volumului acestor piese, flexibilitate structurală mai mare respectiv o gamă de temperaturi de funcționare mult mai mari. Astfel, provocările integrării de sistem a echipamentelor electronice la nivelul VE vor fi atinse.

Problema cea mai mare care se ivește azi la nivelul VE sau VEH este faptul că aceste noi sisteme încă nu se produc în variante modulare. Ca atare, pe viitor se prevede faptul că, la fel cum azi, într-un service auto nu se repară cutia de viteze ci se înlocuiește, așa va fi și cu electronica. Fiind modulară, acele elemente care vor ceda uzului, vor fi direct înlocuite fără a se presta servicii de reparație. Studii serioase se fac la nivelul circuitelor electronice de forță pentru a atinge performanța în care componentele din care acestea sunt realizate să reziste fără probleme la un ciclu complet de viață al autovehiculului.

Dacă ne referim la modularitatea componentelor unui VE, în lucrarea [3] s-a demonstrat faptul că conceptul de integrare de sistem la nivelul autovehiculelor electrice și conceptul de modularizare al componentelor se leagă foarte bine. La nivelul electronicii de putere, modularizarea este un avantaj extrem care permite simplificarea procesului de integrare de sistem. Se știe că electronica se realizează din componente, al căror distribuție în volum se poate realiza după bunul plac al proiectantului. Astfel, se poate realiza o optimizare la maxim a spațiului, integrând electronica foarte bine la nivelul VE.

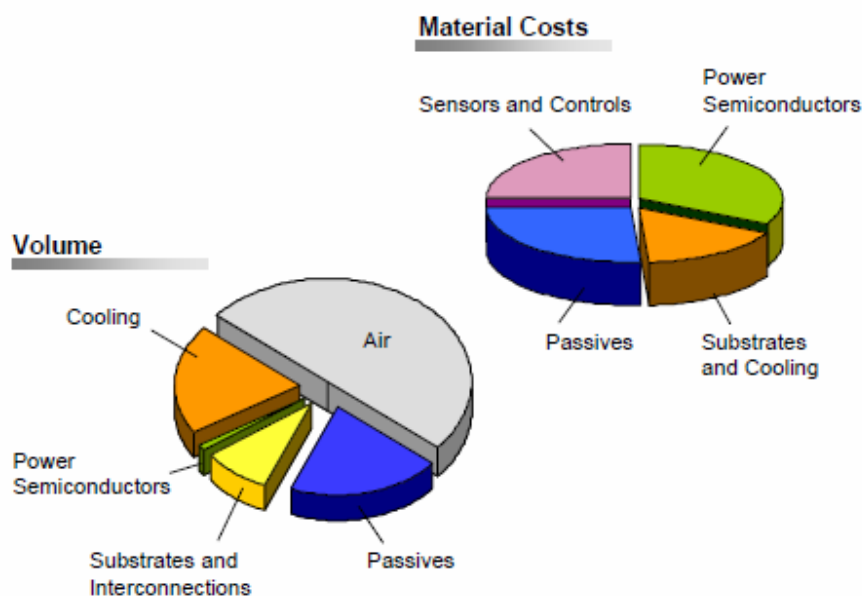


Fig.3.9 Costuri și distribuția în volum a materialelor în convertoarele electronice de putere moderne

În general, reducerea prețului este un element dominant la nivelul proiectării VE. La o analiză mai amănunțită este foarte limpede faptul că nu doar partea de putere a electronicii este cea costisitoare și participantă la ocuparea volumului, ci și restul componentelor au un rol poate mai semnificativ decât elementele semiconductoare de

putere în sinea lor. În fig. 3.9 se vede o distribuție foarte limpede a prețului de cost al materialelor ce intră în componența unui convertor de putere, dar totodată este analizată și necesitatea de volum a fiecărui element. Astfel, dacă observăm figura 3.9, elementele de putere ocupă efectiv cel mai puțin volum dar în același timp sunt și cele mai costisitoare. Componentele pasive, cum a fost menționat mai sus, împreună cu sistemele de răcire sunt răspunzătoare de cel mai mare volum ocupat la nivelul VE.

Parte din aceste aspecte vor fi analizate și dezbătute și în subcapitolele ce urmează a fi prezentate.

3.2.4. Modulele de putere și răcirea lor

Cu toate că electronica de putere și construcția componentelor semiconductoare a evoluat ascendent, ceea ce are ca rezultat conversia energiei electrice la un randament ridicat, răcirea foarte serioasă a semiconductoarelor este indispensabilă. La o putere convertită de 100kW, de exemplu 3kW pierderi apar la o conversie cu randament de 97%, datorită dimensiunilor mici ale pastilei semiconductoare. Aceasta duce la densități de flux termic foarte mari, nu doar la nivelul componentelor semiconductoare dar și la întreg traseul de la pastila semiconductoare până la radiatorul sistemului.

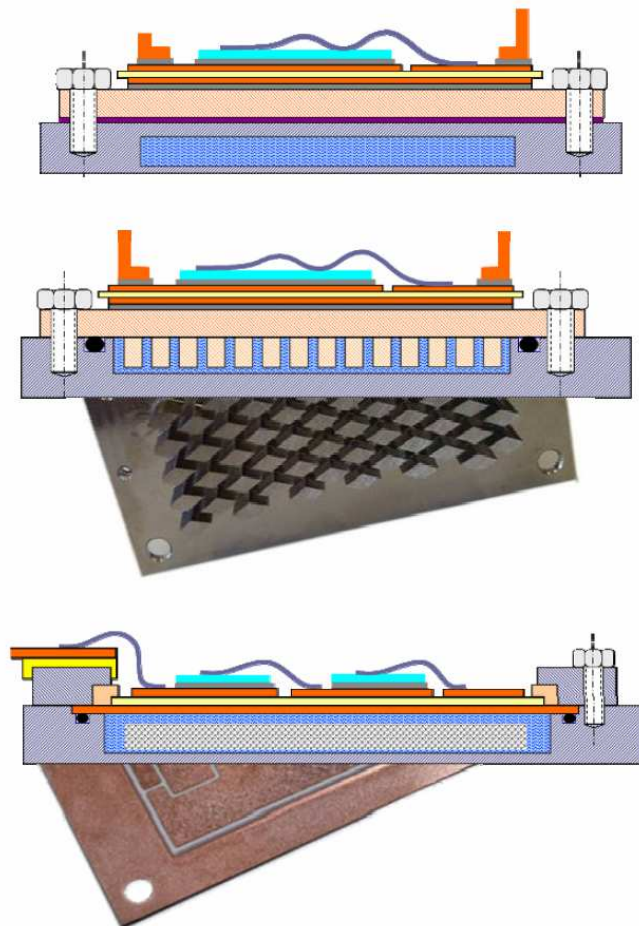


Fig. 3.10 Variante constructive pentru module de putere cu o singură zonă de răcire

Ca atare, optimizarea acestui traseu este crucială, atât din punct de vedere al costurilor dar și al duranței sistemului respectiv al fiabilității lui. Această optimizare include selecția atentă a materialelor, luând în seama factorul de transmisie termică a lor. Dacă aceste materiale sunt greșit alese, ciclurile termo-mecanice la care sunt supuse convertoarele produc oboseală prematură a sistemului și implicit scrutarea vieții. Materiale pe substrat ceramic, cum ar fi alumina, nitratul de aluminiu sau nitratul de silicon sunt cele mai utilizate, având performanțe termice ridicate. Materialele ceramice sunt lipite direct pe straturi de aluminiu sau cupru, rezultând astfel elemente metalizate în dublu strat. Modulele de putere tradiționale sunt realizate prin presarea pe piesă a unui sau a mai multor straturi de cupru sau AlSiC. Astfel, rezultatul obținut este o componentă robustă ușor de manevrat de către operator.

Aceste module trebuie să fie prinse către elementele de răcire prin intermediul unui material foarte bun conductor din punct de vedere termic dar izolator din punct de vedere electric (vezi figura 3.10 sus). Există o serie de materiale utilizate cu acest scop, iar utilizarea lor corectă facilitează durata de viață a sistemului.

Există module care au în construcția lor elementele de răcire incorporate direct de pe linia de producție (vezi figura 3.10 mijloc). Aceasta are o serie de avantaje cum ar fi lipsa materialului de contact termic, răcire mult mai bună și mai sigură, respectiv dimensionare sistemului de răcire de către producătorul de componente.

Pentru o răcire optimă se poate realiza o creștere a suprafeței de contact cu agentul de răcire, prin intermediul unor aripioare, extensii sau suprafețe neregulate. Geometria sistemului de răcire trebuie proiectată funcție de natura agentului utilizat pentru preluarea căldurii de la radiator (apa, aer, ulei etc.).

O variantă avansată a sistemelor de răcire este caracterizată de lipsa planului de răcire care, diminuează dificultățile de adaptare a piesei în sistem (figura 3.10 jos). Metalizarea carcasei componentei face ca aceasta să poată fi fixată foarte ușor către radiator facilitând mult răcirea ei [4].

Figura 3.11 detaliază integrarea unui sistem electronic care are răcire directă. Convertorul este format din 6 IGBT-uri, formând jumătăți de punte H. Module sunt de putere mare, 600V și 200A, convertorul fiind montat direct în motoare, iar axul acestora este conectat direct la roți.

Răcirea unui asemenea sistem poate fi realizată prin corpuri de răcit care se bazează pe principiul *Shower power* [5]. O asemenea implementare este una simplă, eficientă și la cost redus.

Necesitatea izolării față de agentul de răcire lichid este eliminată la un asemenea sistem prin fixarea pieselor de răcit direct pe corpul prin care circulă agentul lichid. Acest lucru este un avantaj important și care facilitează integrarea de sistem a electronicii de putere la nivelul vehiculului. Practic, așa se elimină necesitatea utilizării șuruburilor speciale pentru izolare, a valvelor sau a altor piese necesare pentru păstrarea lichidului la locul lui.

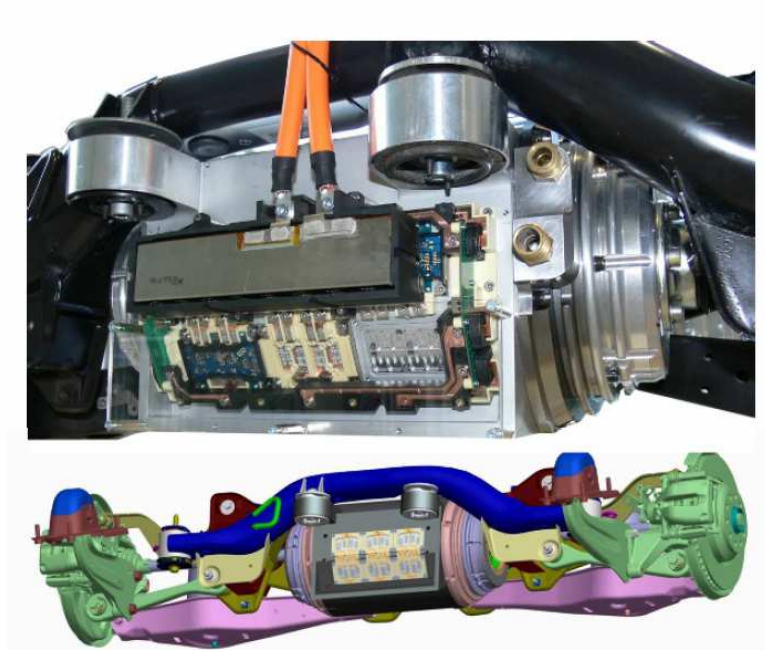


Fig.3.11 Invertor dublu cu răcire directă integrat direct într-un dublu motor pentru transmisie directă [6]

Un exemplu de asemenea aplicație este prezentat în fig. 3.11. Fixarea locală a pieselor către carcasa de aluminiu prin care circulă agentul de răcire este foarte simplă realizată prin lipire sau presare.

Un asemenea nivel de integrare de sistem poate atinge potențial serios în ceea ce privește reducerea costurilor de implementare, densitate de putere mare, eficiență ridicată, iar ca atare tot lanțul cost/rendament al componentelor sistemului este facilitat.

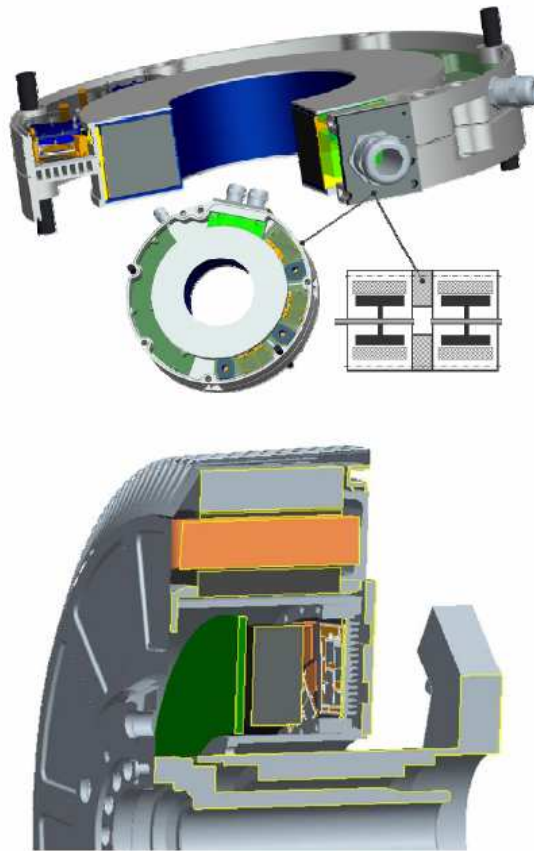


Fig.3.12 Invertor dublu cu răcire directă integrat direct într-un dublu motor pentru transmisie directă [6]

Asemenea nivel de integrare de sistem poate atinge potențial serios în ceea ce privește reducerea costurilor de implementare, densitate de putere mare, eficiență ridicată, iar ca atare tot lanțul cost/rendament al componentelor sistemului este facilitat.

Selecția elementelor semiconductoare sunt clasificate pe natura tehnologiei lor constructive. Astfel acestea pot fi realizate cu două, trei sau patru straturi. Dioda semiconductoare, de exemplu, este realizată în două straturi, unul de tip p și unul de tip n dopate cu siliciu printr-un process de difuzie. Componentele cu două straturi au deci o joncțiune de tip $p-n$. Componentele cu trei straturi conțin practic două joncțiuni. În această clasă intră toate tranzistoarele din zilele noastre. Componentele cu patru straturi sau trei joncțiuni sunt categorisite ca tiristoare.

Un aspect important de discutat la nivelul componentelor semiconductoare este raportul kVA/kW și *factorul de putere*. În cele ce urmează vor fi detaliate câteva aspecte cheie privind relația V-A, bazate pe puterea aparentă făcând referire la puterea reală pe care componenta semiconductoare o poate transfera.

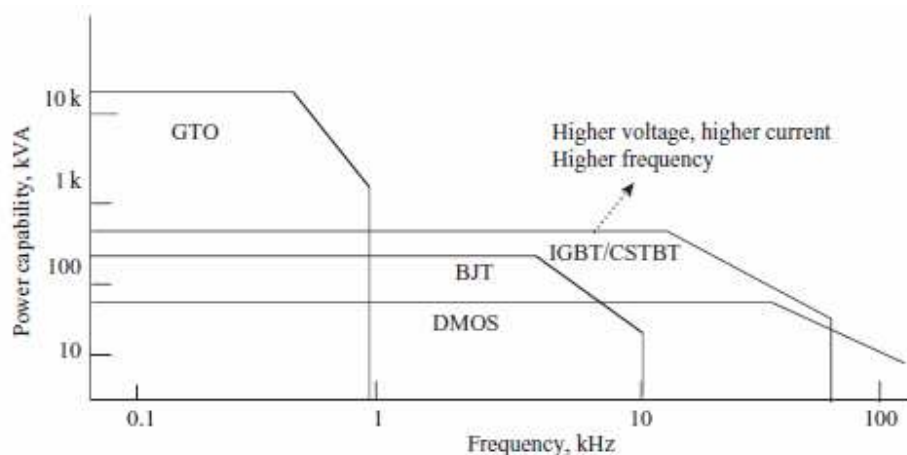


Fig. 3.13. Capacitatea de a transfera putere funcție de frecvența de comutație a componentelor semiconductoare

Realmente toate convertoarele electronice de putere utilizate în sisteme hibride sunt bazate pe utilizarea tranzistoarelor tip IGBT. Azi există o varietate de componente semiconductoare a căror clase de tensiuni și curenți variază de la 3kV la 6kV respectiv de la 3kA la 4.5kA. Tiristoarele ating cele mai înalte cote de curent comutat însă frecvența lor de comutație este joasă. Tranzistoarele tip GTO pot comuta curenți de 3kA la 4.5kV însă frecvența maximă de comutație a lor este de 700Hz. Cele tip ETO (emitter turn off) pot comuta curenți de 4kA la 4.5kV și au frecvența net superioară celor tip GTO. Azi, există eforturi substanțiale, al căror rezultat are deja impact pe piața curentă, privind tranzistoarele tip IGBT. Acestea pot comuta curenți de 3.5kA și tensiuni de 6.5kV (nu simultan) la frecvențe înalte (peste 100kHz), transferând puteri de ordinul zecilor de kW.

Fig. 3.13 face referire la catalogarea acestor componente semiconductoare în vederea simplificării selecției lor atunci când vine vorba de implementarea unui convertor electronic.

Bibliografie:

- [1] Burke, A.: 'Cost-effective combinations of ultra-capacitors and batteries for vehicle applications'. Proceedings of the Second International Advanced Automotive Battery Conference, Las Vegas, NV, February 2002
- [2] März M., Poech M.H., Schimanek E. Schletz A.: *Mechatronic Integration into the Hybrid Powertrain - The Thermal Challenge*. Proc. Int. Conf. on Auto-motive Power Electronics (APE), Paris, 2006
- [3] Patent Application: US 2009-0219694-A1
- [4] Hofmann M., Rauh H., Eckardt B., März M.: *Mechanische Integration von Leistungselektronik in die Antriebseinheit eines Axle-Split-Hybrids*. Tagung "Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge", München, 2009, ISBN 978-3-8169-2817-1
- [5] Eisele R., Olesen K.K., Osterwald F.: *Innovative Kühltechnologie für Leistungsmodule*. VDE ETG Fachtagung, ETG Fachbericht 105, Bad Nauheim, 2006, S. 67 – 73
- [6] Schmidhofer A., Starzinger J., März M., Eckardt B., Tadros Y.: *Perspectives of Inverter Integration in Vehicle Powertrains*. Proc. 3rd Int. Conf. on Auto-motive Power Electronics (APE), Paris, 2009