



Porsche GT3 R Hybrid

Technológiahordozó és guruló labor

A hibridtechnika minden kétséget kizáróan a jövőbeli egyéni mobilitás egyik kulcseleme lesz. Alsó-, közép- és felsőkategóriás járművekben már egy ideje elérhető a piacon a környezetbarát technológia. A Porsche 911-eshez hasonló sportautókhoz azonban eddig nem jelent meg a szériaérett hibridkoncepció. Hogy a vérbeli sportautók hibrid hajtásrendszerének optimális kialakítása, illetve e jövőbe mutató technológiák versenysportban való alkalmazása során felmerülő kérdéseket hitelesen meg tudják válaszolni, egyúttal pedig elébe menjenek a vásárlói igényeknek, a Porsche Motorsportnál kifejlesztették a GT3 R Hybridet.

Célkitűzés

A Porsche GT3 R Hybrid egy versenyautó, amely a mérnökök számára guruló laboratóriumként szolgál. Új technológiák kifejlesztése a motorsport számára, majd ezek későbbi szériagyártmányokba való átvétele nagy hagyományokkal bír a Porschénál. Ezen felül a motorsportban véghezvitt fejlesztések nagyon hatékonyak, és a következő előnyöket kínálják:

- rövid fejlesztési időszakok, mivel a kis létszámú csapat miatt hatékony és célirányos a fejlesztés,
- eredményorientált igénymenedzsment szükséges a nehéz versenykörnyezetben,

- szoros határidő-követés az előzetes versenynaptárnak megfelelően,
- gyors és tartós hibaelhárítás.

A 911 GT3 R Hybrid fejlesztése során a következő célokat tűzték ki maguknak a fejlesztők:

- átfogó „know-how” felépítése az olyan fontos jövőbe mutató technológiákban való elmélyülés során, mint az energiatárolás és az elektromos meghajtások,
- különböző rendszerek és komponensek kifejlesztése a versenysport számára, figyelembe véve a potenciális technológiai transzfert a szériába,

- egy energetikailag hatékony, ugyanakkor teljesítményorientált működési stratégia kifejlesztése,
- a hibrid rendszer validálása egy 24 órás futamon való bevetés során,
- a sportautószegmensben elért technikai kompetencia demonstrálása.

Járműkoncepció

A 911 GT3 R Hybrid valójában a 2010-es modellévből származó GT3 R-en alapul, az imént megfogalmazott célkitűzések elérése érdekében egy hibrid hajtásrendszerrel lett kiegészítve **(1. ábra)**. A hagyományos belső égésű motor



1. Teljesítményelektronika
2. Portáltengely 2 elektromotorral
3. Magasfeszültségű vezeték
4. Elektromos lendkeres energiatároló
5. Teljesítményelektronika

1. ábra: Porsche 911 GT3 R Hybrid – rendszeráttekintés

Porsche-típusú módon a jármű farában található. A négyliteres, hathengeres boxermotor teljesítménye 353 kW. A hatsebességes, szekvenciális erőátviteli egység a 911 GT3 RSR modellből származik. Az elektromos meghajtásról két, egyenként 60 kW teljesítményű elektromotor gondoskodik, amelyek az első tengely fölött helyezkednek el. Az utóbbiakról érkező forgatónyomaték egy állandó, lassító áttételen keresztül jut el az első tengelyig. A lassítások alkalmával részben visszanyert mozgási energia tárolásáról egy elektromos lendkerék gondoskodik, amit a jármű tömegközéppontjának a közelében, az „anyósülés” helyén helyeztek el. Mind az elektromos energiatárolóhoz, mind pedig az elektromos hajtórendszerhez szükség van egy-egy teljesítményelektronikára, amelyek egy magasfeszültségű egyenáramú áramkörben helyezkednek el.

Az itt bemutatásra kerülő hibrid rendszer esetében egy, az egyes hajtásrendszerek

vonóerőit összegző parallel hibrid rendszerrel beszélhetünk. A rendszer a 911 GT3 R Hybridben a következő előnyökkel szolgál:

- jobb súlyelosztás és ezáltal optimálisabb jármű-kiegyensúlyozottság,
- átmeneti négykerék-meghajtás,
- egyszerűbb technikai kivitelezhetőség az egyes hajtásrendszerek szétválasztása következtében,
- egyszerűen illeszthető és felhasználható a rendszer.

Elektromos hajtás

Az első tengelynél található elektromos hajtás valójában egy közös házban egyesített két elektromotort fed, amelyek egy-egy lamellás kuplungszerkezeten, egy állandó lassító áttételen és egy rövid hajtótengelyen keresztül kapcsolódnak az első tengely megfelelő oldali kerekéhez **(2. ábra)**.



1. Lassító áttétel
2. Lamellás kuplung
3. Elektromotor
4. Teljesítményelektronika

2. ábra: elektromos hajtóegység



1. Forgórész
2. Állórész
3. Teljesítményelektronika

3. ábra: elektromos lendkerekes energiatároló



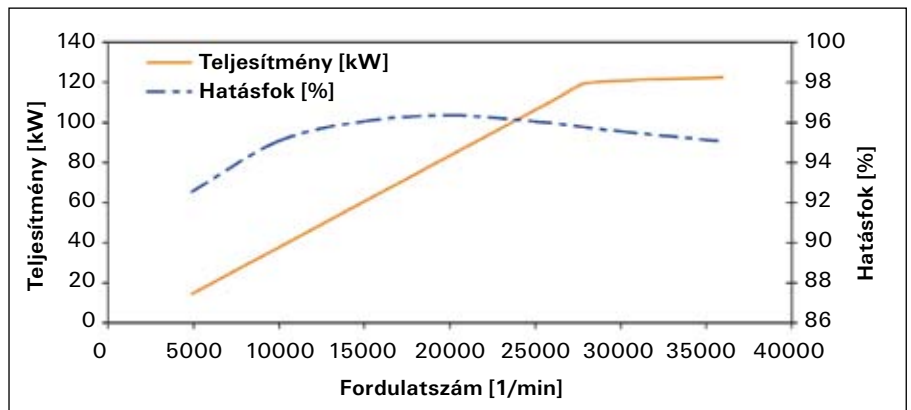
Mindkét elektromotor rendelkezik egy helyzetérzékelővel, amely az optimális üzem érdekében meghatározza a forgórész pontos helyzetét. A rotor helyzetétől, a fordulatszámtól és a teljesítményigénytől függően szabályozza egy teljesítményelektronika az elektromotorok áramellátását. A motorok és a teljesítményelektronika egy saját, alacsony hőmérsékletű hűtőkörrel rendelkeznek, amelynek a hűtője a jármű elejében, középen került elhelyezésre. A hűtőcsatornák közvetlenül a hajtórendszer házában kerültek kialakításra.

Az elektromos meghajtás itt egy fordított portáltengelyes kialakításnak felel meg, ami az elektromotor kimenő tengelye és a rövid köztes tengely közötti tengelyeltolásra, illetve a követelményként megfogalmazott alacsony súlypontra vezethető vissza.

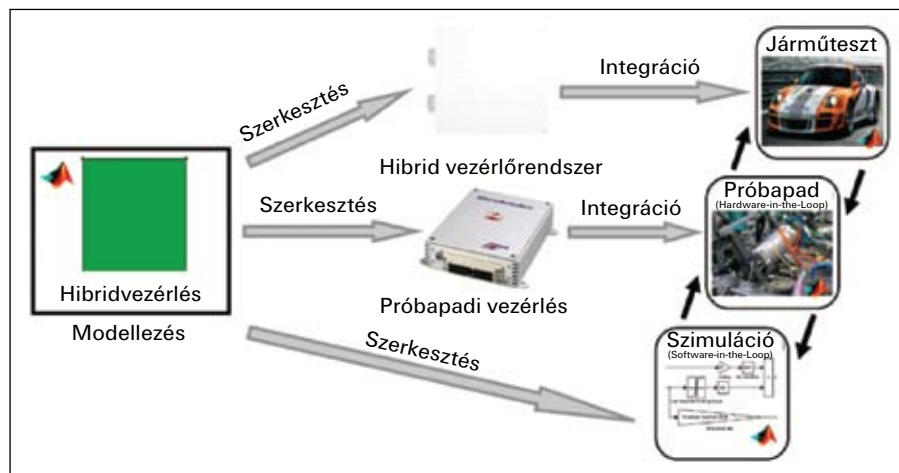
Az egymás mellett elhelyezkedő, állandó mágnesezésű szinkron motorok mindegyike mechanikusan leválasztható, és így külön-külön

képesek az első tengely egy-egy kerekének meghajtására. Ennek következtében nincs szükség differenciálműre. Az elektromotorok maximális teljesítménye 15 000 1/perc fordulatszám 60 kW, maximális forgatónyomatékuk a kihajtótengelyükön 80 Nm. A lassító áttétel miatt azonban a jármű kerekén mérve 650 Nm „elektromos eredetű” forgatónyomaték áll rendelkezésre. Fékéskor generátor üzemmódba váltanak az elektromotorok. Az így visszanyert energia az egyenáramú körön keresztül jut el a lendkerék rendszerű tárolóba.

Az állandó mágnesezésű elektromotorban fellépő hiba esetén, mint például egy rövidzár, nagy nyomatékingadozások léphetnek fel, amelyek aztán menetdinamikai határhelyzetben a jármű stabilitásának elvesztését idézhetik elő. Ezért biztonsági megfontolásokból egy hidraulikusan működtethető lamellás kuplungot integráltak a bolygómű külső fogaskoszorújára. Ez hivatott meg-



4. ábra: a lendkerekes energiatároló teljesítmény- és hatásfokdiagramja



5. ábra: validációs folyamat

szakítani az elektromotor és a kerék közti erőfolyamot. Ezen funkció aktiválását a járművezető is kiválthatja egy műszerfali kapcsolóval, vagy pedig automatikusan is bekövetkezhet egy felügyelőrendszeren keresztül (szigeteltségfelügyelő, főkapcsoló, hibafelismerő algoritmusok a hibrid rendszer vezérlőegységében).

Elektromos lendkerékes energiatároló

Az elektromos lendkerék tárolja a fékezésnél visszanyert elektromos energiát kinetikus formában, vagyis mozgási energiaként. A rendszer egy alumínium biztonsági házból, egy állórészből és egy műanyag forgórészből áll; ez utóbbiba mágnesdarabkákat juttatnak a gyártás során. Az energiafolyamot egy teljesítményelektronika vezérli.

Az energiatároló elvben egy elektromos gép (3. ábra), amelynek a külső forgórésze egyben lendkerékként is funkcionál. A mágneses részek úgy vannak kialakítva, hogy azok külön mágneses pólusokat képeznek, mint egy állandó mágnesezésű elektromotor esetében. A műanyag forgórész egymásra merőleges szénzálas rétegekkel van megerősítve, hogy akár 40 000/perc fordulatszámot és az ezzel együtt járó nagy centrifugális erőket is képes legyen elviselni.

A lendkerék felpörgetésekor az állórész tekercseire juttatják a rekuperáció során visszanyert elektromos áramot, így az állórészben létrejövő mágneses mezők és a forgórész állandó mágneses mezői közötti kölcsönhatás következtében forgó mozgás jön létre. Az elektromos energia így alakul át mozgási energiává. Az eltárolt elektromos energia járműhajtásra történő felhasználása során ez a folyamat megfordul, és a forgórész a mozgási energiájának leadása

közben lefékeződik. A lendkerékes tárolóegység és a hozzá tartozó teljesítményelektronika is egy-egy saját olajhűtőkörrel rendelkezik.

A jelenlegi elektromotorokkal szemben a lendkerék forgórészében egyáltalán nincs fém. Ezáltal egyrészt növekszik a biztonság, hiszen így eleve kizárható, hogy egy esetlegesen fellépő hiba esetén az elszabaduló fémrészek átüssék a lendkerékházat. Másrészt nem lép fel vasvesztés a forgórészben, így annak felmelegedése csökken, hatásfoka pedig jelentősen javul.

A forgórész fordulatszámának növelésével nő a lendkerék energiatároló képessége (4. ábra). Hogy a hibrid rendszer a futam alatt

állandóan magas teljesítményszinten bevethető legyen, soha nem veszik ki az összes tárolt energiát a rendszerből, vagyis nem állítják meg a lendkereket, hanem a 28 000 és 36 000/perc közötti fordulatszám-tartományban járatják. A nagy felületi sebesség és az ebből adódó légellenállás (súrlódás) következtében légköri nyomáson a forgórész a megengedett határhőmérséklet fölé hevülne. Ezt elkerülendő, a lendkerékházban vákuum van, ami egyúttal a hatásfokra is jótékony hatással van.

A lendkerékes energiatároló rendszer egyetlen, kopásnak kitett alkatrésze a forgórész kerámia csapágyazása a házban. Csupán ezt kell a terheléstől függően bizonyos, előre definiált időközönként cserélni, hogy ismét az újkorinak megfelelő állapotba kerüljön a rendszer. További öregedési jelenség eddig még nem lépett fel. A 2010-es évben a teszt- és versenykörülmények közepette semmiféle mechanikai hiba nem lépett fel. A többi energiatároló technológiával szemben az elektromos lendkeréknek a következő számottevő előnyei vannak:

- akár a 94%-ot is meghaladó magas hatásfok (töltés vagy visszanyerés),
- nagymértékű ciklustartósság és -állandóság,
- egyszerű és robusztus mechanikus felépítés és ezért kisfokú komplexitás,
- környezetvédelem az újrahasznosítható anyagok révén,
- nagy fajlagos teljesítmény.



6. ábra: kezelőszervek



7. ábra: Porsche 911 GT3 R Hybrid a Nürburgringen

Hibrid vezérlés

A hibrid járműfunkciókat egy központi vezérlőegység vezérli. Ennek a feladata a diagnosztika, a teljesítmény- és nyomatékszabályozás, illetve az elektromotorok, az energiatároló és a további elektromos és hidraulikus komponensek vezérlése. Ezen kívül a rendszer különféle meghibásodásai esetére szükséges biztonsági funkciókkal és intelligens energiagazdálkodási stratégiákkal is felvértezték. A vezérlőegység szoftvere Matlab Simulink alapon lett modellezve. A szoftver fejlesztése és tesztelése a Porsche 911 GT3 R Hybrid fejlesztési folyamatába lett integrálva. Amint az **5. ábrán** látható, a tesztelés folyamata 3 szintre van bontva: komplett járműszimuláció hibrid vezérléssel együtt (software-in-the-loop), fékpad tesztelés a hibrid hajtás komponenseivel (hardware-in-the-loop) és végezetül magában a versenyautóban való tesztelés. Mivel minden szinten a vezérlésnek ugyanaz az alapmodellje és ugyanarra az átjárható Simulink eszköztárra épül, ezért minél magasabb tesztszinten járunk, annál robusztusabb rendszerről, illetve annál kifinomultabb vezérlésről beszélhetünk. A magasabb szintek teszteredményei az alsóbb szintek kiindulási feltételeinek pontosítására és a modellek validálására használhatók. A főbb hibrid járműfunkciók bemutatása végett a következőkben a „rekuperáció” és a „boost” funkciókkal ismerkedhetünk meg.

Rekuperáció

Rekuperáció során a jármű mozgási energiájának egy része nyerhető vissza, tárolható el, majd használható fel ismét a jármű hajtására vonóerőtöbbletként. A hidraulikus fékrendszer mellett a portáltengelyen ke-

resztül a két elektromotor generátor üzemen szintén kiveszi a részét a kívánt fékerő eléréséből. Ez egy elektromos teljesítményfolyamhoz vezet a lendkerekes energiatároló egység irányába, ami így feltöltődik.

A kívánt lassulás a fékpedál helyzetén keresztül kerül meghatározásra. Ez az információ aztán bemenő paraméterként érkezik a vezérlőegységbe, ahol a betáplált stratégia szerint meghatározásra kerül az elektromotorok által kifejtendő fékezési nyomaték. A keréken mérhető fékteljesítmény így a hagyományos fékrendszer és az elektromotorok által nyújtott fékteljesítmények eredőjeként áll elő.

A rekuperáció legfontosabb előnyei a következők:

- az egyébként kárba vesző fékezési energia egy részének visszanyerése,
- a hagyományos fékrendszer tehermentesítése, aminek következtében számottevően csökken annak kopása.



Boost

A 911 GT3 R Hybridnél továbbra is a belső égésű motor felel elsődlegesen a meghajtásért. A vezetési situációtól és az energiatároló töltöttségétől függően juthat további elektromos vonóerő az első kerekre. Egyes pályaszakaszokon rövid ideig és teljes mértékben spontán maximális teljesítménnyel használható a boost funkció. Máskülönb a többlet vonóerőt a menetdinamikai situáció függvényében szabályozzák. Hogy a boost funkciót optimalisan ki lehessen használni, a rendszer vezérlése állandóan figyelemmel követi a jármű valamennyi mérhető jellemzőjét. Ezek közé tartoznak többek között a kerékfordulatszám, a kormányzási szög, valamint a hossz- és keresztirányú gyorsulás. Továbbá a lendkerekes energiatároló töltöttségi állapota is állandó felügyelet alatt áll. A hibrid menedzsment jelzi a vezetőnek a rendszer készenléti állapotát és a rendelkezésre álló elektromos többleteljesítményt egy műszerfali LED felvillanásával.

A járművezető általi működtetés alternatívájaként a funkciót a betáplált programnak megfelelően a hibrid vezérlőrendszer automatikusan is tudja aktiválni. Az első kerek hajtására fordított többlet elektromos energia ilyenkor célirányosan a belső égésű motor tehermentesítését szolgálja, vagyis azonos köridők mellett az egész hajtásrendszer hatásfokát növeli. A legjelentősebb előnyök a következők:

- kisebb tüzelőanyag-fogyasztás, ebből következően kevésbé gyakori boxkiállítások vagy kisebb járműtömeg (azonos kiállási gyakoriság esetén)

- a kiegészítő hajtónyomaték következtében jobb kigyorsítások,
- lehetőség a többleteljesítmény lehívására bizonyos versenyhelyzetekben,
- jobb vonóerő-átadás az aszfalra az időleges négykerék-hajtásnak köszönhetően.

Működtetés

A 911 GT3 R Hybrid műszerfalán található néhány hibridspecifikus kezelőszerv, amelyek a vezető számára lehetővé teszik a rendszer működtetését (6. ábra). Itt a következő kezelőszervekről van szó:

- boost funkciót aktiváló fül a kormánykerék mögött az elérhető elektromos többlet-hajtónyomaték lehívásáért,
- a lendkerekes tárolóegység töltöttségének kijelzője,
- boost funkció aktiválásának javasolt időpontját megadó LED-kijelző,
- jellegzőváltó a hibridspecifikus programok előhívásához.

A versenysport által megkövetelt, a boost funkció aktiválását szolgáló kezelőszerv ergonomikusan a kormánykerék mögé került. A központi LCD-kijelzőn egy visszajelző, illetve egy LED-sor jelzi a vezetőnek a lendkerekes energiatároló egység töltöttségi állapotát. Emellett a vezető egy LED-felvillanásának formájában javaslatot is kap a hibrid rendszer optimális használatára. Továbbá van a kormánykeréken egy úgynevezett jellegzőváltó, amely az előre beállított speciális menetprogramok közötti váltást teszi lehetővé. Ezek között van például egy „hatékony üzemmód”, amely csökkentett teljesítmény mellett a lehető leghatékonyabb működést hivatott szolgálni, kedvező tüzelőanyag-fogyasztás mellett. A váltásra és a boost funkció aktiválására figyelmeztető LED-ek ennek megfelelően módosított időpontban adják a jeleiket. Emellett a vezető számára fontos adatok is megjelenítésre kerülnek a központi LCD-kijelzőn, amelyeket a hibrid vezérlőegység folyamatosan kiértékel.

Versenyevetések – stratégia

Az eredeti célkitűzéseknek megfelelően az új technikai megoldásoknak a pályán kellene bizonyítaniuk. Ezért a jármű 2010. május 15-én a Nürburgringen megrendezett 24 órás futamon extrém terhelésnek lett alávétve (7. ábra), ahol figyelemre méltó módon mindjárt meg is mutatta a teljesítménypotenciálját. A 911 GT3 R Hybrid több mint 8 órán át vezette a 200 járműből álló mezőnyt, 22 óra és 15 perccel a futam

A közelmúltban alkalmam nyílt beszélni néhány fejlesztőmérnökkel a Porsche berkeiből. A rendszert illetően feltett kérdéseimre elmondták, hogy a hibrid rendszer igazi előnye a versenysportban, hogy a szabályzatban előírt minimális versenysúlyt így nem ballaszt súlyok beépítésével érik el, hanem egy olyan rendszerrel, amely a kigyorsítások alkalmával többlet vonóerőt szolgáltatva jobb menetdinamikához segíti a járművet, vagy a „hatékony programot” aktiválva kedvezőbb tüzelőanyag-fogyasztást tesz lehetővé, aminek következtében csökkenthető a boxkiállások száma, illetve bizonyos mértékben tehermentesíthető a belső égésű motor. A jelenlegi rendszert beépítve, a jármű tömege azonban meghaladja a szabályzatban előírt minimumot, így a következő fontos lépés a hibrid rendszer tömegének csökkentése. Mindemellett már a jelenlegi többletsúllyal is bizonyította a rendszer a versenypályán való létjogosultságát.

911

Amint az a sajtóban már mindenütt megjelent, a következő 911-es sorozat minden egyes példányát hibridként kerülne boldog tulajdonosához. Ez az általam megkérdezett mérnökök szerint még nem eldöntött tény. Így elképzelhető, hogy továbbra is a kínálat részét képezi majd egy (néhány) csupán belső égésű motorral hajtott változat. Az azonban mindenképpen valószínű, hogy a következő 911-es széria lesz az első olyan modellcsalád a Porsche kínálatában, ahol felbukkan az előző cikkben bemutatott hibrid rendszer közúti használatra (is) alkalmassá tett változata. Természetesen itt a CO₂-kibocsátás csökkentése hatványozottabban fontos törekvés.

Cajun

Végezetül a Cayenne leendő „kistestvéréről”, az Audi Q5-alapú Cajunról is esett néhány szó. A modell a Cayenne-nel együtt a lipcsei gyárban készül majd. Amíg azonban a Cayenne a külső formáját már a pozsonyi VW-gyárban elnyeri, egy gyártósoron a padlólemez-testvéreivel (VW Touareg, Audi Q7), és csak a végszerelés, illetve a Porsche-specifikus alkatrészek beszerelése folyik Lipcsében, addig a Cajun teljes egészében Lipcsében fog készülni. Vagyis a karosszéria nem az Audi Q5-tel közös gyártósoron fog készülni Ingolstadtban, hanem egy teljesen új karosszériagyárat építenek a kis Porsche SUV-nak.

(H. T.)

kezdését követően azonban a belső égésű motorban előállt károsodás miatt feladni kényszerült a futamot. A hibrid rendszer mindenesetre mindaddig a legcsekélyebb hiba nélkül működött.

A következő éles bevetésre szeptemberben került sor, az Egyesült Államokbeli Atlantában megrendezett 1000 mérföldes megbízhatósági versenyen, amit „kis Le Mans”-nak is hívnak. A versenyre való felkészülés során a hangsúly a hibrid funkciók automatizálásáért felelős szoftver optimalizálásán volt. A 911 GT3 R Hybrid utolsó bevetése a 2010-es évben Zhuhai-ban, Kínában volt, egy 1000 km-es futamon. Ez a pálya a szűk kanyarokkal és hosszú egyenesekkel számottevő rekuperációs lehetőséget biztosított a hibrid versenyautónak. A hibrid rendszer által biztosított többlet vonóerőt kiválóan ki lehetett használni a kanyarból való gyakori kigyorsítások során. A 911 GT3 R Hybrid a leggyorsabb és legtakarékosabb GT-autóként fejezte be a futamot, méghozzá úgy,

hogy a GT-osztályban 3 kör előnye volt, és eggyel kevesebb alkalommal kényszerült ki a boxba üzemanyagot vételezni.

Jövőkép

A 24 órás versenyen a guruló laboratórium tanúbizonyságot adott a benne rejlő potenciálról. Az elektromos hajtóegység robusztusán és megbízhatóan működött. A későbbi futamokra újabb szoftverfunkciók lettek kifejlesztve és optimalizálva. Az begyűjtött értékes tapasztalatok a versenyautó második generációjának fejlesztéséhez kerülnek felhasználásra. A hangsúly ezúttal a magasabb szintű rendszer-integráción és a rendszer tömegének csökkentésén van, nem utolsósorban azzal a céllal, hogy előkészítsék a hibrid rendszert a széria járművekben való alkalmazásra.

ÖSSZEÁLLÍTOTTA: HEGEDŰS TAMÁS

Forrás: MTZ 2011/05 356-363

Fotógrafika: Porsche, Nszl