

SERİ-PARALEL HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLARDAKİ GÜÇ DAĞITICI (POWER SPLIT) MEKANİZMASININ MOTOR HIZI DEĞİŞİMİNE BAĞLI İNCELENMESİ

Emre ARABACI¹ (ORCID: 0000-0002-6219-7246)*

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Emin Gülmez Teknik Bilimler MYO. 15300, Bucak/Burdur/Türkiye

Geliş / Received: 01.02.2018

Kabul / Accepted: 22.05.2018

ÖZ

Hibrit elektrikli taşıtlarda elektrik motoru ve içten yanmalı motor (İYM) olmak üzere farklı karakteristiklere sahip iki farklı tahrik sistemi bulunmaktadır. Bu iki tahrik sistemi farklı taşıt karakteristiklerine uygun olarak seri, paralel veya seri paralel şekilde düzenlenebilmektedir. Günümüzde yaygın olarak hem seri hem de paralel tahrik sistemlerinin avantajlarını en uygun düzeyde birleştiren seri-paralel tahrik sistemi kullanılmaktadır. Seri paralel tahrik sisteminde elektrik motoru ve İYM'nin güç aktarım stratejisinin düzenlenmesi için güç dağıtıcı (power split) mekanizması kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada belirli hız aralığında sabit tork elde edilebilen bir İYM'nin güç dağıtıcı mekanizmasına adapte edilmesiyle güç aktarım stratejisinin bu hız aralığına bağlı olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Güç dağıtıcı mekanizmasında yörünge/güneş dişli oranı sabit tutulmuştur. Bununla birlikte taşıtın için farklı hız ve güç taleplerinde motojeneratörlerin motor/jeneratör durumları ile batarya sisteminin şarj/deşarj durumları İYM'nin farklı hızları için hesaplanmış ve tartışılmıştır. Sonuç olarak güç dağıtıcı mekanizması için sabit torkta İYM hızının etkileri ve İYM hızını etkileyen parametreler belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Hibrit elektrikli taşıt, Seri-paralel, Güç dağıtıcı

INVESTIGATION OF THE POWER SPLIT MECHANISM IN SERIAL-PARALLEL HYBRID ELECTRIC VEHICLE DEPENDING ON THE ENGINE SPEED VARIATION

ABSTRACT

Hybrid electric vehicles have two different powertrain systems with different characteristics, electric motor, and engine (ICE). These two powertrain systems can be arranged in serial, parallel or serial-parallel according to different vehicle characteristics. Nowadays, a serial-parallel drive system is widely used which optimally combines the advantages of both serial and parallel powertrain systems. The power split mechanism is used to manage the power transfer strategy of the electric motor and the ICE in the serial-parallel powertrain system. In this study, it is aimed to analyze the powertrain strategy depending on the speed range by adopting an ICE which can obtain constant torque at a certain speed range to the power split mechanism. In the power split mechanism, the ratio of ring/sun gear is kept constant. However, the motor/generator states of the motogenerators and the charge/discharge states of the battery system for different speed and power requirements for the vehicle have been calculated and discussed for different speeds of the ICE. As a result, for the power split mechanism, the effects of ICE speed on fixed torque and the parameters affecting ICE speed are determined.

Keywords: Hybrid electric vehicle, Series-Parallel, Power split

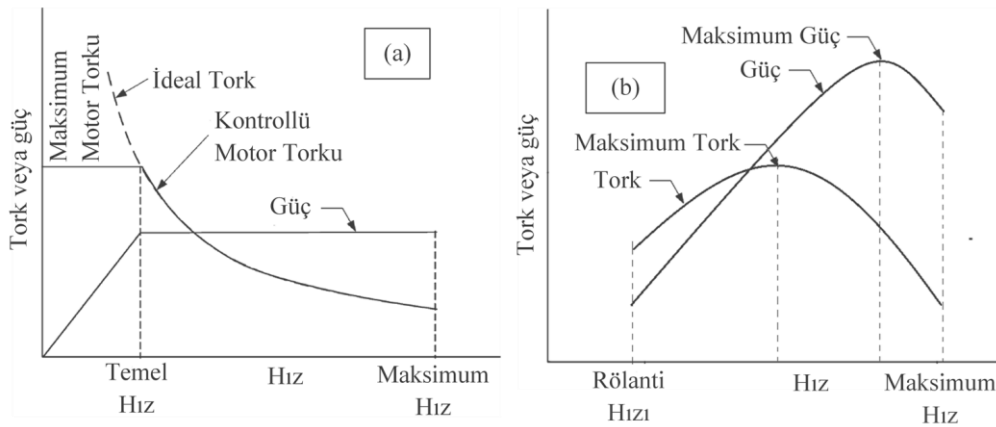
*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 546 274 65 95 ; e-mail / e-posta: earabaci@mehmetakif.edu.tr

SERİ-PARALEL HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLARDAKİ GÜÇ DAĞITICI (POWER SPLIT) MEKANİZMASININ MOTOR HIZI DEĞİŞİMİNE BAĞLI İNCELENMESİ

1. GİRİŞ

Taşıtların verimliliği, geçmiş yıllarda performans ve ekonomi bakımından değerlendirilirken günümüzde bu iki kriterin yanında taşıtların yaymış oldukları kirletici gazların (emisyon) çevresel etkileri bakımından da bir değerlendirme yapılmaktadır. Emisyon düzenlemelerinden dolayı taşıtların verimlilikleri uzun yıllardır önemli bir tartışma konusu haline gelmiştir. Günümüzde kullanılan içten yanmalı motorlar (İYM), 1990'lı yıllardaki İYM'lerle kıyaslandığında olağanüstü performans ve ekonomiye ulaşmış durumdadır. Ancak taşıt sayısındaki artış ile birlikte emisyonlardaki toplam artış engellenemez boyutlara ulaştığı, kabullenilmesi gereken üzücü ve tedirgin edici bir gerçektir [1-3]. Otomotiv endüstrisi, taşıt performansından ödün vermeksizin emisyonları ve fosil yakıt bağımlılığını azaltmaya yönelik önemli araştırmalara odaklanmaktadır [3-6]. Özellikle günümüzde emisyonları azaltmak için seçici katalitik indirgeme (SCR), dizel oksidasyon katalizörü, katkılı yakıtlar, otomatik stop-start gibi teknolojiler hem motor hem de yakıt ve taşıt teknolojisinde oldukça ilerlemeler kaydedildiği bilinmektedir [3, 7-9].

Hibrit elektrikli taşıtlar (HET), belirli operasyonel görevler sırasında tahrik enerjisinin, en az bir depo veya konvertörün içinde olması gereken iki veya daha fazla çeşit veya türdeki enerji deposu, kaynak veya dönüştürücüden elde edildiği taşıttır [10, 11]. HET'lerde temel tahrik kaynakları içten yanmalı motor ve/veya elektrik motorudur. İki tahrik kaynağı seri, paralel veya bunların kombinasyonu şeklinde bağlanabildiği gibi iki ayrı tahrik kaynağı olarak da kullanılabilir. Seri HET'lerde içten yanmalı motor, jeneratör ve motor tek bir hat üzerinde sıralıdır ve içten yanmalı motorun tekerleklere hareket iletimi söz konusu değildir. Bununla birlikte paralel HET'lerde içten yanmalı motor ile motor+jeneratör (motojeneratör) hareket aktarımını yöneten güç anahtarı cihazı ile tekerleklere hareket iletimi yapılabilmektedir ve seri HET güç aktarım mimarisine göre güç yönetimi bakımından oldukça fazla avantaja sahiptir. Paralel HET'deki başlıca problem içten yanmalı motor ile elektrik motorunun performans karakteristiklerinin farklılığından kaynaklı güç aktarımı için ayrı bir transmisyon ihtiyacı duyulması ve motorun çok geniş hız aralıklarında çalışma zorunluluğunun bulunmasıdır (Şekil 1). Seri-paralel HET'lerde güç aktarımı hem seri hem de paralel HET'lerdeki benzer şekilde yapılabilmektedir. Karmaşık veya kombine HET ise seri-paralel HET'in özelleştirilmiş bir versiyonudur [12-14]. Her bağlantı şeklinin birbirine göre avantaj ve dezavantajları bulunabilmektedir [15-16]. İdeal olarak her bir güç veya tahrik kaynağı, diğerinin dezavantajlarını en aza indirgeyerek diğerinin verimliliğini ve performansını artırmak için çalışmaktadır [12, 15]. HET'lerde de, günümüz taşıtlarında olduğu gibi enerji kaynağı olarak sıvı yakıt kullanılmaktadır. HET'ler günümüzün çevre kirliliği sorunu ve HET'lerde elektrik motorunun yanısıra menzil artırıcı (range extender) görevini yerine getiren içten yanmalı bir motor bulunmaktadır. Hibrit taşıtlarda tahrik sistemi mevcut sistemlerle karşılaştırıldığında kontrol mekanizmaları, destek sistemleri ve iki motorun kontrolünün harmanlanması gibi alt sistemlerden dolayı oldukça karmaşıktır [13, 14, 20, 21].



Şekil 1. Elektrik motoru (a) ve İYM'nin (b) performans karakteristikleri

HET'ler konvansiyonel taşıtlara göre oldukça fazla yakıt tasarrufu potansiyeli taşımaktadır ve emisyon seviyeleri oldukça düşük seviyededir ve HET'lerde, günümüz İYM'ye sahip bir taşıtta olduğu gibi yakıt ikmali yapılabilme avantajı bulunmaktadır. [21-23].

HET'ler günümüzde otoyol kullanımı için üretilen en yaygın elektrikli taşıtlardan birisidir. Otomotiv üreticilerinin bir kısmı HET'leri, tamamen elektrikli taşıtların menzil sınırlaması ve şarj gibi problemlerin

E. ARABACI

giderilmesine kadar gerekli olan geçici, kısa vadeli ve ara bir çözüm olarak düşünürken, bir kısmı ise HET teknolojisinin uzun vadede de kabul göreceği ve yaygınlaşacağı görüşündedir [3, 24, 25].

HET'ler her ne kadar İYM için kullanılan fosil yakıttan dolayı egzoz emisyonu üretiyor olsalar da, tahrik sisteminin motorun en verimli şekilde tasarlanması, ilk hareketin çoğunlukla elektrik motoruyla yapılması ve bu nedenle içten yanmalı motorun rölanti şartlarında çalışırken oluşturduğu emisyonların oluşmaması, rejeneratif frenleme gibi atık enerji ile bataryaların şarj edilebildiği sistemlerin bulunmasından dolayı HET'lerde üretilen emisyon miktarı ve tüketilen yakıt miktarı, günümüzde kullanılan fosil yakıtlı taşıta göre kıyaslandığında önemli ölçüde azdır [26-31].

HET'ler mikro, hafif (mild) ve tam (full) olarak ayrılmaktadırlar. Bununla birlikte bataryası bağımsız olarak şebeke elektriğinden şarj edilebilen fişli (plug-in) HET'ler bulunmaktadır [21, 23]. Hibrit elektrikli bir taşıtın mikro, hafif veya tam hibrit olması hibritleme derecesine (hybridization factor "HF") bağlıdır. HF, elektrik motorundan elde edilen maksimum gücün (P_m) taşıtın toplam maksimum gücüne oranı (P_m+P_e) olarak tanımlanmaktadır (Eşitlik 1). Taşıtın toplam maksimum gücü motor karakteristiklerindeki ve güç aktarımlarındaki farklılıklardan dolayı P_m+P_e toplamından daha küçük olabilmektedir. İYM'nin kullanıldığı taşıtlarda hibritleme derecesi 0 iken tam HET'lerde hibritleme derecesi %40-60 aralığında olabilmektedir [16, 28, 29].

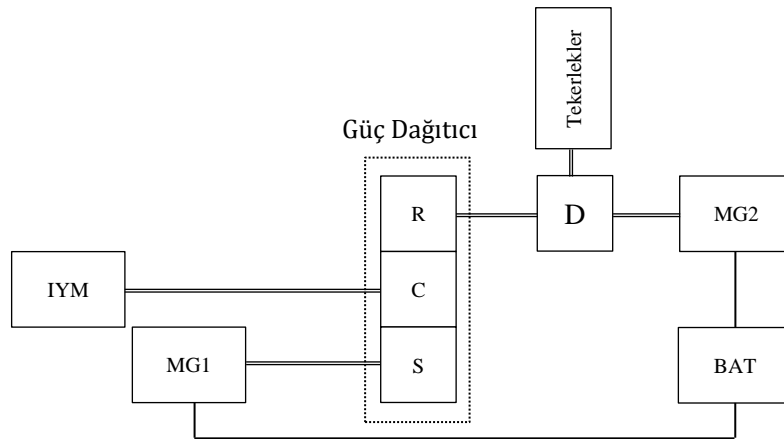
$$HF = \frac{P_m}{P_m + P_e} \quad (1)$$

Seri-Paralel HET'lerde içten yanmalı motor genel olarak doğrudan taşıta hareket vermek için değil, elektrik motoruna destek için ve bataryayı şarj etmek için kullanılan sistemler olduğundan genellikle en uygun yakıt tüketiminin sağlandığı motor hızında veya hız aralığında çalıştırılması hedeflenmektedir. [32-36].

2. SERİ-PARALEL HET'LERDE GÜÇ DAĞITICI MEKANİZMASI İLE GÜÇ AKTARIMI

İYM'ler yapısı gereği doğrusal olarak elde edilen işi krank mili yardımıyla dairesel harekete dönüştürmektedirler. Ayrıca yanmanın etkisi ile yakıt enerjisinin büyük bir kısmı faydalı işe dönüşmeden ısı veya egzoz yoluyla atılmaktadır. Elektrik motorlarında ise elektrik enerjisi manyetik etki ile faydalı işe doğrudan dönüştürülebilmektedir. Elektrik motorlarındaki ısı kayıpları içten yanmalı motorlarda olduğu gibi çok fazla değildir. Tüm bu avantajlarının yanında elektrik motorlarının taşıtlarda tahrik kaynağı olarak kullanılmasının en büyük dezavantajı ise elektrik enerjisinin depolanması ve elde edilmesi (ikmal) olarak bilinmektedir. Elektrik enerjisinin depolanması için bataryalar kullanılmaktadır ve ömrünü tamamlamış bataryaların bertaraf edilmesi tüm dünya için halen çözüm bekleyen bir problem olarak beklemektedir [37-40].

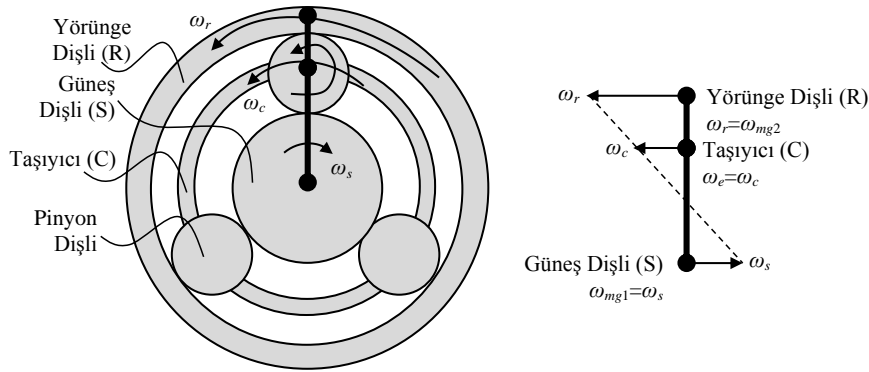
Elektrik motorunun ve İYM'nin dezavantajlarının azaltılıp avantajlarından maksimum seviyede faydalanabilmek için bu iki sistemin hangi şartlarda kullanılacağı, başka bir ifade ile güç ve aktarımının nasıl olacağı önemli bir mühendislik konusudur.



Şekil 2. Seri-paralel HET'e ait güç aktarımı [41]

SERİ-PARALEL HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLARDAKİ GÜÇ DAĞITICI (POWER SPLIT) MEKANİZMASININ MOTOR HIZI DEĞİŞİMİNE BAĞLI İNCELENMESİ

Şekil 2’de seri-paralel HET’lere ait güç aktarımı yapısı görülmektedir. Seri-paralel HET’lerde güç aktarımı güç dağıtıcı bir sistem ile yapılabilmektedir. Güç dağıtıcı temel bir planet dişli sistemidir. Seri-paralel HET’de bulunan güç dağıtıcı mekanizmasında içten yanmalı motor taşıyıcıya (C), birinci motojeneratör (MG1) ise güneş dişliye (S) bağlıdır. Diferansiyel ve dolaylı olarak tekerleklere hareket yörünge dişli (R) üzerinden iletilmektedir. Diferansiyel güç dağıtıcı mekanizmasından bağımsız olarak ikinci motojeneratör (MG2) bağlıdır. MG1 ve MG2 ayrı ayrı bataryayı şarj etmekte (jeneratör durumu) veya bataryadan enerji olarak tekerleklere doğrudan veya dolaylı olarak hareket iletimi (motor durumu) sağlamaktadır (Şekil 3). Güç dağıtıcı taşıtın seyir esnasında karşılaştığı durumların enerji ihtiyaç-tüketim bakımından değerlendirildiğinde, bir HET için ihtiyaç duyulan yalnız elektrik motoru, yalnız İYM, birleşik, rejeneratif frenleme, sabit şarj gibi operasyonları düzenlemede kullanılmaktadır [21, 41]. Bununla birlikte yakıt ekonomisi, emisyon, farklı performans taleplerinde kararlı bir çalışma için hibrit operasyonlar sırasında motor karakteristiğini anlık olarak kontrol altında tutmak da çok önemlidir. Tüm bu operasyonların gerçekleştirilmesinde enerji yönetim stratejilerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir [41].



Şekil 3. Güç dağıtıcı sistemini oluşturan planet dişli sisteminin yapısı ve hız diyagramı

Bir planet dişli sistemi için genelleştirilmiş açısal hız ilişkileri dişli diş sayılarına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\omega_c = \omega_r \frac{N_r}{N_r + N_s} + \omega_s \frac{N_s}{N_r + N_s} \quad (2)$$

İYM'nin hızı taşıyıcı hızına ($\omega_e = \omega_c$), MG1'in hızı ise güneş dişli hızına ($\omega_{mg1} = \omega_s$), yörünge dişlinin hızı ise MG2 hızına ($\omega_r = \omega_{mg2}$) eşittir. Tork değerleri incelendiğinde Taşıyıcı torku (T_c) İYM torkuna (T_e) eşittir. Yine aynı şekilde güneş dişlinin torku (T_s) MG1'in (T_{mg1})'in torkuna eşittir. Buna göre güç dağıtıcı mekanizmasındaki tork eşitlikleri aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\frac{T_r}{T_c} = \frac{N_r}{N_r + N_s} \Rightarrow T_r = T_c \frac{N_r}{N_r + N_s} \quad (3)$$

$$\frac{T_s}{T_c} = \frac{N_s}{N_r + N_s} \Rightarrow T_s = T_c \frac{N_s}{N_r + N_s} \quad (4)$$

Belirli bir hızda seyir halinde veya ilk kalkışta veya ivmelenme talebinde taşıt hareketi için istenilen/gerekli tork değerine bağlı olarak diferansiyelden tekerleklere belirli güçteki hareketin aktarılması gerekmektedir. Diferansiyeldeki güç iki temel hareket kaynağı olan MG2 ve güç dağıtıcı sisteminin yörünge dişlisinden (R) elde edilebilmektedir. Uygun durumlarda MG1 direkt motor olarak kullanılarak diferansiyel iletilen harekete etki edebileceği gibi bataryayı şarj etme gibi durumda da kullanılabilir. Bataryanın şarj durumu, taşıt üzerine etki eden dış direnç kuvvetleri, sürüş karakteristiği gibi duruma bağlı olarak diferansiyel iletilen gücün hangi kaynaktan (MG2 ve/veya İYM) ne kadar gelmesi gerektiği belirlenmektedir. Bunun için birçok elektronik sistem ve algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmaların performansı, hibrit elektrikli taşıtta kullanılan batarya, İYM ve MG'lerin çalışma karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin bir batarya için boyut ile kapasite aynı zamanda ağırlık doğru orantılıdır. Yine aynı şekilde taşıtın güç talebi de yine taşıt ağırlığı ile doğru orantılıdır. İYM'nin çalışma şartındaki güç değeri ve taşıtın talep ettiği güç durumuna göre MG2 taşıta hareket

E. ARABACI

verebileceği gibi bataryayı da şarj edebilir. Güç dağıtıcı sisteminde güç dengesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$P_c = P_e = P_r + P_s = P_r + P_{mg1} \quad (5)$$

Burada P_{mg1} değeri pozitif ise MG1 jeneratör olarak çalışıp bataryayı şarj ediyordur ve değer negatifse P_e 'ye ek olarak bir güç üretmek için MG1 motor olarak çalışmakta ve bataryadan enerji tüketmektedir. Taşıtın talep ettiği güç diferansiyelden elde edilen güçtür ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

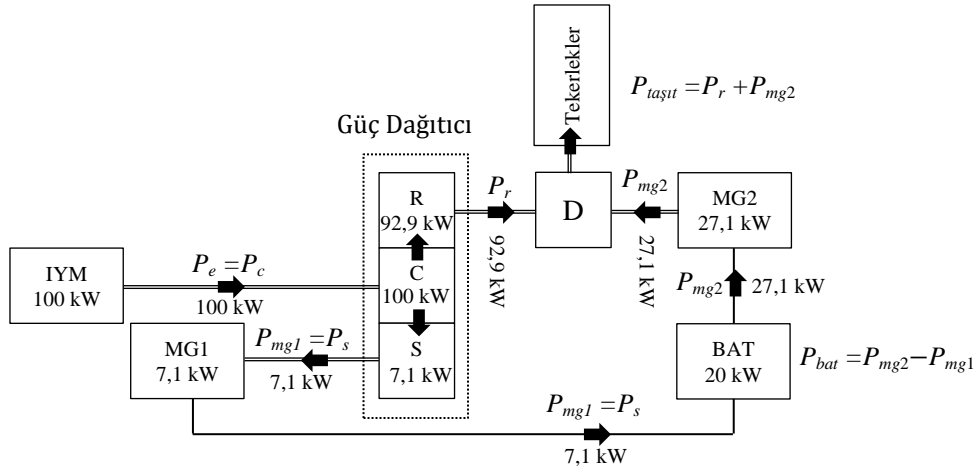
$$P_{taşıt} = P_{dif} = P_{mg2} + P_r \quad (6)$$

Burada P_{mg2} değeri negatif ise MG2 jeneratör olarak çalışıp bataryayı şarj ediyordur ve değer pozitifse P_e 'ye ek olarak bir güç üretmek için MG2 motor olarak çalışmakta ve bataryadan enerji tüketmektedir. MG2 ve MG1'in jeneratör veya motor olarak kullanılma durumuna bağlı olarak batarya gücü aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$P_{bat} = P_{mg2} - P_{mg1} \quad (7)$$

Genel bir değerlendirme olarak burada P_{mg2} değeri negatif ise batarya şarj oluyordur ve değer pozitif ise batarya motorların (MG1 ve/veya MG2) hareketi için deşarj oluyordur.

Örnek olarak 100 kW güç üreten bir sistemde yörünge dişli ile güneş dişlinin diş sayısı oranı 2.4 ve taşıtın güç ihtiyacının 120 kW olduğu bir durum için bu durumdaki muhtemel güç akış diyagramı şekil 4'te gösterilmiştir.



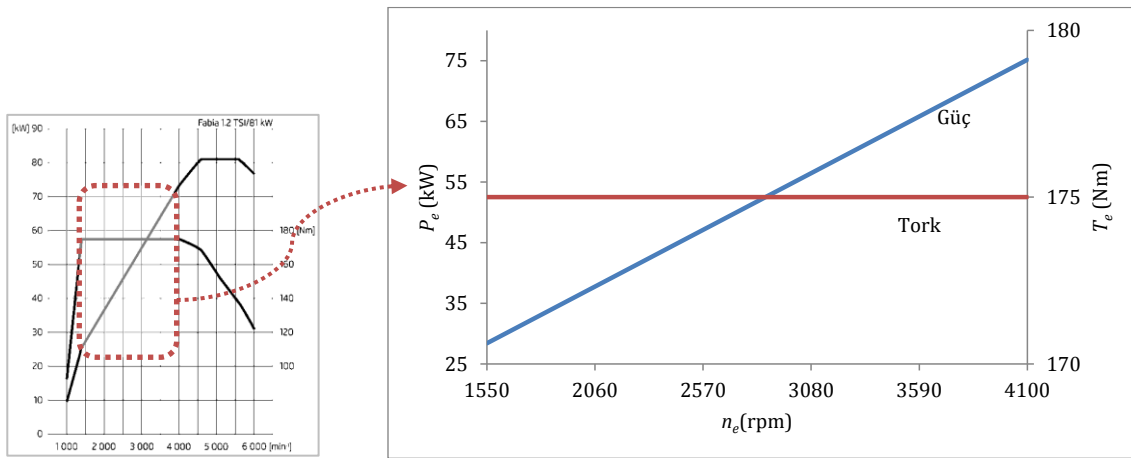
Şekil 4. Örnek bir durum için güç akış diyagramı

Şekil 4 incelendiğinde Eş. 2-7 kullanıldığında İYM'nin ürettiği 100 kW'lık gücün 92,9 kW'lık kısmı yörünge dişli üzerinden diferansiyele aktarılarak taşıtın hareketi için kullanılmaktadır. Ancak bu değer taşıtın talep ettiği 120 kW'lık güç talebini karşılayamamaktadır. Bu nedenle MG2 92,7 kW lık gücü 120 kW değerine taşıyabilmek için bataryadan beslenerek 27,1 kW'lık gücü taşıt hareketi için sağlamaktadır. Bununla birlikte İYM'den elde edilen gücün 7,1 kW'lık kısmı güneş dişli üzerinden MG1'e aktarılmakta ve MG1 bataryayı şarj etmektedir. Böylelikle batarya üzerindeki yük azalmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken durum ise basit bir anlatım ile İYM'den 100 kW ve bataryadan 20 kW güç elde edilerek taşıt hareket ettirilmektedir. Ancak seri paralel hibrit elektrikli taşıtlarda ise İYM gücünün bir kısmı bataryayı beslemek için MG1 tarafından tüketilirken batarya yükü değiştirilmeden MG2'nin motor yükü artırılmaktadır. Bu da elektrik motorunun karakteristik avantajlarından daha fazla faydalanılmasını sağlamaktadır. Burada anlatılan durum tek bir durumdur ve taşıtın güç talebi, batarya şarj durumu, batarya kapasitesi, menzil talebi, İYM'nin güç potansiyeli, yakıt veya enerji tüketimi gibi parametrelere bağlı olarak çok sayıda durum oluşmaktadır. Her bir durum için şekil 4'te gösterilen güç dengesi de değişmektedir.

SERİ-PARALEL HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLARDAKİ GÜÇ DAĞITICI (POWER SPLIT) MEKANİZMASININ MOTOR HIZI DEĞİŞİMİNE BAĞLI İNCELENMESİ

3. ÖRNEK BİR SERİ-PARALEL HET SİSTEMİNDE PARAMETRİK UYGULAMA

Bilindiği gibi her taşıt her performans talebini karşılayamaz. HET’lerde de bu durum değişmemektedir. Bu nedenle diğer motorlu taşıtlarda olduğu gibi HET’ler de belirli bir performans aralığındaki güç talebini/ihtiyacını yerine getirebilmektedir. Taşıtın güç ihtiyacı, sürüş, yol ve yük karakteristiğine bağlı olarak değişmektedir. Seri-Paralel HET’lerde İYM genellikle ekonominin ön plana çıktığı en uygun çalışma noktasında (hızında) çalıştırılmaktadır. HET’lerde İYM’nin karşılayamayacağı bir güç talebi olması halinde elektrik motorundan bu talebin karşılanması istenmektedir. Ancak İYM hızı güç akış diyagramını tamamen değiştirebilmektedir. Söz konusu bu çalışmada maksimum tork değerini geniş bir motor hızı aralığında sağlayabilen egzoz turbo aşırı doldurmalı benzin motorunun kullanımında sabit torktaki farklı motor hızlarına karşılık HET’in güç aktarım karakteristiğinin değişimi incelenmiştir. Çalışmada referans olarak ele alınan motor 1,2 litre hacme sahip aşırı doldurmalı benzin motoru için 1550-4100 rpm aralığında 175 Nm maksimum tork değeri elde edilebilmektedir. Tork değeri sabit olduğundan dolayı motor hızına bağlı olarak motor gücü de doğrusal olarak değişmektedir.



Şekil 5. Maksimum tork değerinin elde edildiği motor hızı aralığında motor gücü değişimi

Hesaplamalar için taşıtın güç ihtiyacı, taşıtın hız talebi ve İYM hızı giriş değişkenleri olarak belirlenmiştir ve bu değişkenler tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Hesaplamalarda kullanılan giriş değişkenleri ve değerleri

Değişkenler	Değerler
Güç İhtiyacı (kW)	30-40-50-60-70-80-90-100
Taşıt Hız Talebi (m/s)	10-17-24-31-38
İYM Hızı (rpm)	1550-2060-2570-3080-3590-4100

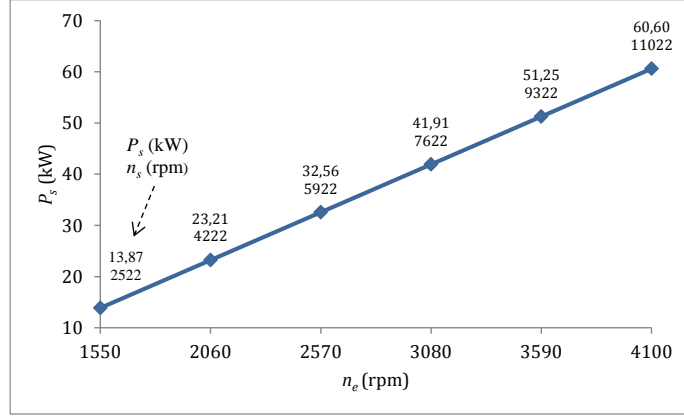
Sabit olan diğer giriş parametreleri ise şu şekilde kabul edilmiştir. Tüm İYM hızı değerlerinde motor torku sabit 175 Nm’dir. Tekerlek çapı sıklıkla kullanılan 205/55 R16 lastik boyutu için 632 mm olarak hesaplanmıştır. Diferansiyel oranı (r_d) genel olarak 3.5-4 aralığında olduğundan dolayı 3,75 olarak seçilmiştir. Yörünge dişli ve güneş dişli diş sayıları oranı 7/3 olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte batarya şarj durumu güç ihtiyacında yeterli, güç fazlalığında ise şarj edilebilir bir durumda olduğu kabul edilmiştir. Hibrit elektrikli taşıtlarda batarya şarj durumu (SOC) algoritmaları ve çözümleri için güç tüketimi, menzil, taşıt ağırlığı, batayanın kapladığı alan, MG’lerin kapasiteleri gibi durumlar etkili rol oynamaktadır ve ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle SOC ile ilgili kısım bu çalışma için kapsam dışı bırakılmıştır.

Taşıt hızının ve dolaylı olarak tekerlek hızının değişimine bağlı olarak yörünge dişlinin hızı da değişmektedir. Bununla birlikte planet dişli diş sayıları değişmediğinden dolayı $N_r/(N_s+N_r)$ ve $N_s/(N_s+N_r)$ değerleri sabit ve sırasıyla 0,7 ve 0,3’tür. Buna bağlı olarak motor torku sabit olduğundan dolayı T_r ve T_s değerleri sabit ve sırasıyla 122,5 ve 52,5 Nm’dir. Bu tork dağılımının değişmesi için dişli oranının değişmesi gerekmektedir. Bu çalışmada dişli oranı sabit ve tork değeri de sabit kabul edildiğinden dolayı tork dağılımı da sabit olmaktadır.

Taşıyıcıdaki güç (P_e) İYM gücüne (P_e) eşittir. Güneş dişlinin (MG1) gücü İYM hızına bağlı olarak değişmekte (Şekil 6) iken yörünge dişlinin gücü taşıt hızına göre doğrusal olarak değişmektedir (Şekil 7). Tam tersi olarak

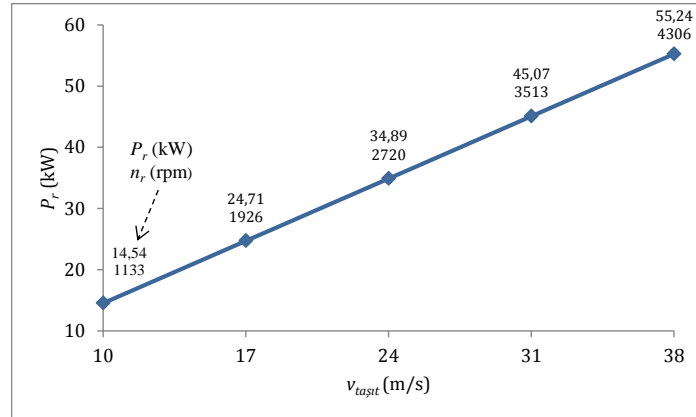
E. ARABACI

güneş dişlinin gücü taşıt hızından, yörünge dişlinin gücü ise İYM hızından bağımsızdır. Ayrıca her iki dişlinin gücü de taşıtın güç ihtiyacından bağımsızdır.



Şekil 6. Motor hızına bağlı olarak güneş dişli (MG1) gücünün değişimi

Şekil 6 incelendiğinde İYM hızının (n_e) artması ile birlikte güneş dişliye bağlı olan MG1'in hızı da artmaktadır. MG1 gücünü belirleyen birincil değişken İYM hızına bağlı değişen İYM gücüdür. İYM torku sabit kabul edildiği için MG1 torku da sabit bir değerdir (52,5 Nm). Ancak MG1 ister motor ister jeneratör olarak kullanılsın, her iki durumda da belirli bir hızın üzerinde çalışması mekanik kayıplara neden olabilmektedir. Bununla birlikte düşük hızlarda çalıştırılması durumunda verim kaybı olabilmektedir. Bu durumda MG1 için optimum çalışma hızı aralığı belirlenerek İYM hızı sınırlandırılabilir veya MG1 ile güneş dişli bağlantısı için sabit bir redüksiyon oranı oluşturularak sistem ile İYM hızı daha da esnek hale getirilebilir. Her iki seçenekte de MG1 gücü sınırlandırılmaktadır.

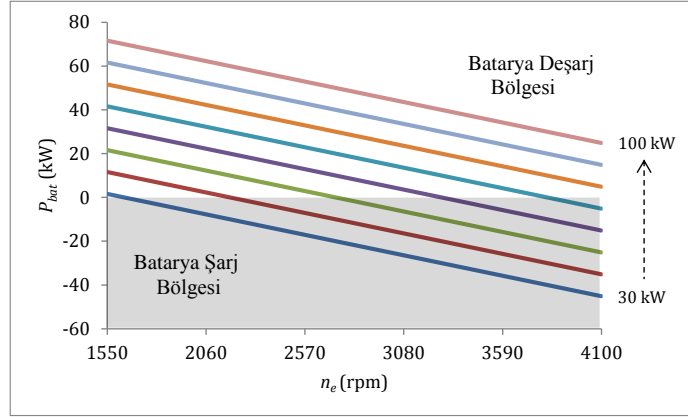


Şekil 7. Taşıt hızına bağlı olarak yörünge dişli gücünün değişimi

Şekil 7 incelendiğinde taşıt hızının artmasıyla birlikte diferansiyelin hızı ve buna bağlı olarak yörünge dişli hızı da artmaktadır. Yörünge dişli hızı MG1 ve İYM nin çalışma karakteristiğine bağlı olarak değişmektedir. Yörünge dişli gücü MG1 ve İYM'nin gücüne bağlı bir durum olmasından dolayı istenilen taşıt hızında taşıtın güç ihtiyacının fazla olması durumunda eksik güç MG2 tarafından karşılanmaktadır. Tam tersi olarak istenilen taşıt hızında taşıtın güç ihtiyacının az olması durumunda yörünge dişli üzerindeki gücün fazla kısmı MG2 üzerinden bataryayı şarj etmek için kullanılmaktadır.

Şekil 6 ve şekil 7'den anlaşılacağı gibi yalnızca güneş ve yörünge dişlinin hız ve güç durumları için birçok seçenek söz konusudur. Sabit torkta İYM hız aralığı genişletildiğinde bu seçenekler daha da artmaktadır. Burada önemli olan MG1, MG2 ve batarya kapasitelerinin seçimidir. Bataryanın kapasitesinin yanında bataryanın şarj deşarj durumu da diğer önemli bir parametredir. Taşıtın kullanım şartlarına bağlı olarak bataryanın şarj deşarj süreçleri değişebilmektedir. Bu durumu tahmin etmek ne kadar zor ise HET için enerji (veya güç) yönetimi o kadar zor bir durumdur. Bataryanın şarj ya da deşarj gücü taşıtın güç ihtiyacı ve İYM hızı olmak üzere iki temel parametreye bağlıdır (şekil 8).

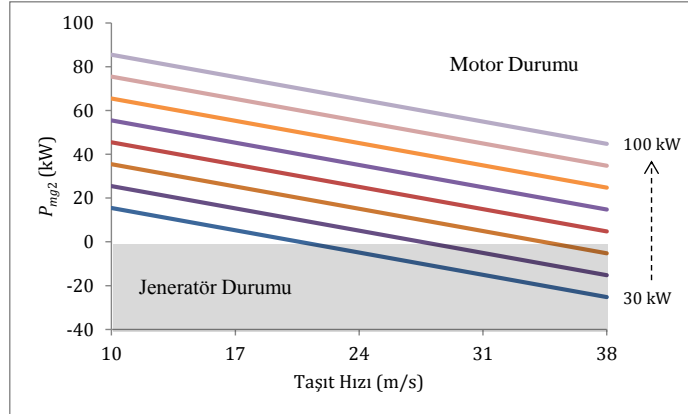
SERİ-PARALEL HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLARDAKİ GÜÇ DAĞITICI (POWER SPLIT) MEKANİZMASININ MOTOR HIZI DEĞİŞİMİNE BAĞLI İNCELENMESİ



Şekil 8. Motor hızına bağlı batarya gücü durumu

Batarya şarj deşarj durumu taşıt hızı ile değişen bir durum değildir. Şekil 8 incelendiğinde İYM hızına bağlı olarak hız arttıkça batarya durumu deşarj durumundan şarj durumuna geçmektedir. Bunun nedeni İYM hızı arttıkça İYM gücü de doğru orantılı olarak artmaktadır. Taşıttın herhangi bir güç talebi için İYM hızı artırıldığında MG2 için harcanan enerji talebi azalmaktadır. Ancak daha önce de açıklandığı gibi motor hızının artmasıyla birlikte MG1'in hızı da artmaktadır. Bu durumda HET için kademeli bir motor hızı tercihi yapılabilir. Bataryanın şarj durumuna geçmesi için motor hızı artırılabilir veya batarya şarjlı iken yakıt ekonomisi isteniyorsa motor hızı azaltılabilir.

Taşıttın güç ihtiyacı İYM'nin yörünge dişliye aktardığı güç ve MG2'nin gücünün toplamı ile karşılanmaktadır. İYM'nin gücü motor hızına bağlı olarak değişmektedir. Ancak MG2'nin gücü talep edilen güç ve taşıt hızına bağlı olarak değişmektedir (şekil 9). İYM hızının değiştirilmesi MG2'den talep edilen gücü etkilememektedir. Yörünge dişli hızı taşıt hızına bağlı bir durum olduğundan dolayı İYM hızı ne olursa olsun istenilen taşıt hızı için yörünge dişli aynı hızda dönmek zorundadır. Başka bir ifade ile İYM torku sabit olduğundan dolayı yörünge dişlinin torku da sabit bir değerdir ve gücü ise taşıt hızına bağlı bir parametredir.



Şekil 9. Taşıt hızına bağlı MG2 gücü durumu

Şekil 9 incelendiğinde düşük taşıt hızlarında MG2 motor olarak çalışmaktadır. Taşıt hızı arttıkça MG2'nin motor kabiliyeti azalmaktadır. Bunun nedeni taşıt hızı arttıkça yörünge dişlideki sabit tork nedeniyle yörünge dişlide oluşan güç değerinin artmasıdır.

Tüm bu durumların SOC ve planet dişli sisteminin sabit dişli oranında yapıldığı, İYM'nin belirlenen motor hızı aralığında sabit tork ürettiği göz önünde bulundurulduğunda sistemin kendi içerisinde kurallarını oluşturduğu görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen tüm bulgular sınır şartları belirlenmiş ve basitleştirilmiş bir HET modeli üzerinden yapılarak herhangi bir algoritmadan veya bir çözüm yönteminden bağımsız olarak bir durum değerlendirmesi yapılmıştır. Sabit olarak değerlendirilen değerlerin de değişken olarak hesaba katılmasıyla çok katmanlı algoritmaların kullanımı bir zorunluluk haline gelmektedir.

4. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada seri-paralel HET'lerde elektrik motoru ile İYM'nin güç aktarımını yöneten güç dağıtıcı mekanizması için yörünge/güneş dişli oranı, diferansiyel dişli oranı sabit tutularak, belirli hız aralığında sabit tork üreten bir İYM için MG1 ve MG2'nin güç ve hız bakımından çalışma şartları, taşıtın belirli aralıktaki güç ve hız taleplerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Güç dağıtıcı mekanizması yapısal olarak basit bir planet dişli sistemidir. Burada temel olarak güneş dişliye, taşıyıcıya ve yörünge dişliye sırasıyla MG1, İYM ve MG2 bağlı olması nedeniyle tüm hareketler ve bağıntılar sınırlı ve sabittir. Taşıt hız ve yük talebinin durumuna bağlı olarak İYM hızının değişmesiyle MG1 ve MG2'nin motor veya jeneratör olma durumu ve bataryanın şarj/deşarj durumu değişmektedir. Buna göre bu çalışmada aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

- İYM torku sabit tutulduğundan dolayı planet dişlideki dişliler üzerindeki tork değerleri yörünge/güneş dişli oranına bağlıdır ve bu tork değerleri bu dişli oranına bağlı olarak değişmektedir.
- İYM hızının artması ile birlikte güneş dişlinin ve buna bağlı olarak MG1'in hızı artmaktadır. Burada İYM hızını sınırlayan temel parametre MG1'in maksimum hızıdır. Bu nedenle İYM hızı sınırlandırılmak zorunda veya MG1 ile güneş dişli bağlantısı için redüksiyon uygulanmalıdır. Bununla birlikte MG1'de redüksiyon kullanıldığında hızına bağlı olarak gücü azalacağından dolayı ister jeneratör ister motor durumunda olsun yine taşıt yük ve hız şartına bağlı olarak MG2 ve batarya üzerindeki yük artacaktır. Alternatif olarak yörünge/güneş dişli oranı değiştirilerek veya MG1 için özel tasarım yapılarak bu problem kısmen de olsa çözülebilir.
- İYM hızı ile birlikte bataryanın şarj/deşarj durumu da değişmektedir. İYM'nin yüksek hızlarında batarya MG1 tarafından şarj edilirken, İYM hızı azaldıkça MG1 jeneratör durumundan motor durumuna doğru bir eğilim göstermektedir.
- Yörünge dişli taşıtın diferansiyeline ve MG2'ye bağlıdır. Bu nedenle yörünge dişlinin hızı İYM hızından bağımsızdır. Yörünge dişlinin torku sabit olmasından dolayı taşıt hızına bağlı olarak yörünge dişlinin gücü de değişmektedir. Bu durumda belirli taşıt hızı için yörünge dişli gücü taşıtın talep ettiği güçten fazla ise MG2 bataryadan beslenerek motor durumunda çalışmaktadır. Tam tersi durumda MG2 jeneratör durumunda çalışarak bataryayı şarj etmektedir.
- MG2'nin motor veya jeneratör durumu taşıtın hızı ve taşıtın güç ihtiyacına bağlı olarak değişmektedir. Yine aynı şekilde MG1'in motor veya jeneratör durumu İYM'nin hızına bağlı olarak değişmektedir. İYM hızının taşıt güç ihtiyacı ve batarya şarj durumuna göre değiştiği düşünüldüğünde MG1'in motor veya jeneratör durumu dolaylı olarak taşıt hızı ve taşıt güç ihtiyacına bağlı olarak değişmektedir.

Yapılan değerlendirmeler neticesinde seri-paralel HET'lerde İYM hızı kararı birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Basit bir değerlendirme ile belirli bir taşıt hızı ve güç talebine bağlı olarak, batarya şarj durumu ve yörünge/güneş dişli oranı değişimi göz önünde bulundurulduğunda MG1 ve MG2 çalışma şartlarını doğrudan etkileyen bir durumdur. İYM torku, İYM hızı ve buna bağlı olarak İYM gücü esasen taşıt hızı ve güç talebine göre değerlendirildiğinde MG1 ve MG2 kapasite ve karakteristiğini de etkilediğinden dolayı hibritleme derecesi (HF) de değişmektedir. Bu çalışmada birçok parametre sabit olarak seçilerek konunun anlaşılabilirliğinin artırılması hedeflenmiştir. Bu çalışma ile birlikte seri paralel HET tasarımı veya benzetimi yapılmak istendiğinde hangi parametrenin hangi parametrelere göre nasıl değiştiği basitleştirilerek belirli sınır şartları dahilinde gösterilmiştir. Belirlenen taşıt hızı ve güç talebi aralığı için özellikle hibritleme derecesi, yörünge/güneş dişli oranı İYM torku ve İYM hız aralığı değişken parametreleri kullanılarak enerji yönetimi, enerji verimliliği, İYM hızı optimizasyonu gibi çalışmalar da yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] KHAN, M.A., et al., Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 29: p. 336-344. 2014.
- [2] RESITOGLU, I.A., K. ALTINISIK, and A. KESKIN, The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(1): p. 15-27. 2015.
- [3] MISHINA, Y. and Y. MUROMACHI, Are potential reductions in CO₂ emissions via hybrid electric vehicles actualized in real traffic? The case of Japan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50: p. 372-384. 2017.
- [4] BIELACZYK, P., J. WOODBURN, and A. SZCZOTKA, An assessment of regulated emissions and CO₂ emissions from a European light-duty CNG-fueled vehicle in the context of Euro 6 emissions regulations. *Applied Energy*, 117: p. 134-141. 2014.

SERİ-PARALEL HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLARDAKİ GÜÇ DAĞITICI (POWER SPLIT) MEKANİZMASININ MOTOR HIZI DEĞİŞİMİNE BAĞLI İNCELENMESİ

- [5] FONTARAS, G. and Z. SAMARAS, On the way to 130gCO₂/km—Estimating the future characteristics of the average European passenger car. *Energy Policy*, 38(4): p. 1826-1833. 2010.
- [6] DU, J., et al., Experimental study on fuel economies and emissions of direct-injection premixed combustion engine fueled with gasoline/diesel blends. *Energy Conversion and Management*, 100: p. 300-309. 2015.
- [7] JOHNSON, T.V., Diesel emission control: 2001 in Review. 2002, SAE Technical paper.
- [8] JOHNSON, T.V., Diesel emission control in review. *SAE international journal of fuels and lubricants*, 1(2008-01-0069): p. 68-81. 2008.
- [9] SOMÁ, A., Trends and Hybridization Factor for Heavy-Duty Working Vehicles, in *Hybrid Electric Vehicles.*, InTech. 2017.
- [10] SEVERINSKY, A.J., Hybrid electric vehicle. 1994, Google Patents.
- [11] SCIARRETTA, A. and L. GUZZELLA, Control of hybrid electric vehicles. *IEEE Control systems*, 27(2): p. 60-70. 2007.
- [12] BAUMANN, B.M., et al., Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 5(1): p. 58-72. 2000. 14
- [13] HUSAIN, I., *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals.*: CRC press. 2011. 18
- [14] ERJAVEC, J., *Hybrid, electric, and fuel-cell vehicles.* Cengage Learning. 2012. 19
- [15] BAYINDIR, K.Ç., M.A. GÖZÜKÜÇÜK, and A. TEKE, A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, 52(2): p. 1305-1313. 2011. 12
- [16] MUSARDO, C., et al., A-ECMS: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management. *European Journal of Control*, 11(4-5): p. 509-524. 2005. 13
- [17] POWELL, B. and T. PILUTTI. A range extender hybrid electric vehicle dynamic model. in *Decision and Control, 1994.*, Proceedings of the 33rd IEEE Conference on. IEEE. 1994. 15
- [18] AN, F., M. BARTH, and G. SCORA, Impacts of diverse driving cycles on electric and hybrid electric vehicle performance., *SAE Technical Paper*. 1997. 16
- [19] PISTOIA, G., *Electric and hybrid vehicles: Power sources, models, sustainability, infrastructure and the market.*: Elsevier. 2010. 17
- [20] GAO, D.W., C. MI, and A. EMADI, Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4): p. 729-745. 2007.
- [21] MI, C. and M.A. MASRUR, *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives.*: John Wiley & Sons. 2017.
- [22] CHAN, C. and K. CHAU, *Modern electric vehicle technology. Vol. 47.*: Oxford University Press on Demand. 2001.
- [23] EHSANI, M., Y. GAO, and A. EMADI, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design.*: CRC press. 2017.
- [24] SMITH, W.J., Can EV (electric vehicles) address Ireland's CO₂ emissions from transport? *Energy*, 35(12): p. 4514-4521. 2010.
- [25] ÅHMAN, M., Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles. *Energy*, 26(11): p. 973-989. 2001.
- [26] LARMINIE, J. and J. Lowry, *Electric vehicle technology explained.* 2012: John Wiley & Sons.
- [27] GAO, Y., L. Chen, and M. Ehsani, Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HET., *SAE Technical Paper*. 1999.
- [28] AHN, J., et al., Analysis of a regenerative braking system for hybrid electric vehicles using an electro-mechanical brake. *International Journal of Automotive Technology*, 10(2): p. 229-234. 2009.
- [29] JOHNSON, V.H., K.B. WIPKE, and D.J. RAUSEN, HET control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions., *SAE Technical Paper*. 2000.
- [30] HU, X., Z. WANG, and L. LIAO, Multi-objective optimization of HET fuel economy and emissions using evolutionary computation., *SAE Technical Paper*. 2004.
- [31] SCHUDELEIT, M., et al. Fuel and CO₂ savings in real driving using machine learning HET operating strategy. in *17. Internationales Stuttgarter Symposium.* Springer. 2017.
- [32] BUECHERL, D., I. BOLVASHENKOV, and H.-G. HERZOG. Verification of the optimum hybridization factor as design parameter of hybrid electric vehicles. in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09.* IEEE. IEEE. 2009. 36
- [33] LUKIC, S.M. and A. EMADI, Effects of drivetrain hybridization on fuel economy and dynamic performance of parallel hybrid electric vehicles. *IEEE transactions on vehicular technology*, 53(2): p. 385-389. 2004. 37

E. ARABACI

- [34] RAHMAN, Z., M. EHSANI, and K. BUTLER, An investigation of electric motor drive characteristics for EV and HET propulsion systems., SAE Technical Paper. 2000. 38
- [35] DUOBA, M., H. NG, and R. LARSEN, In-situ mapping and analysis of the Toyota Prius HET engine., SAE Technical Paper. 2000. 39
- [36] JEONG, J., et al., Optimization of power management among an engine, battery and ultra-capacitor for a series HET: A dynamic programming application. International Journal of Automotive Technology, 18(5): p. 891-900. 2017 40
- [37] POWELL, B., K. BAILEY, and S. CIKANEK, Dynamic modeling and control of hybrid electric vehicle powertrain systems. IEEE Control Systems, 18(5): p. 17-33. 1998.
- [38] FRANK, A., et al., Powertrain configurations for two-motor, two-clutch hybrid electric vehicles., Google Patents. 2016.
- [39] YANG, Y., et al., Comparison of power-split and parallel hybrid powertrain architectures with a single electric machine: dynamic programming approach. Applied Energy, 168: p. 683-690. 2016.
- [40] SABRI, M., K. DANAPALASINGAM, and M. RAHMAT, A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53: p. 1433-1442. 2016.
- [41] LIU, W., Introduction to hybrid vehicle system modeling and control.: John Wiley & Sons. 2013.