



# Efficiency Challenge Electric Vehicle

Elektrikli Araçlarda Diferansiyel

Danışma ve Değerlendirme Kurulu

20.10.2014

Elektromobil ve Hidromobil araçlarına yönelik elektronik diferansiyel hakkında genel teknik bilgi içermektedir. Örnek ve yardımcı bilgi amacı ile paylaşılmıştır.

## 1 GİRİŞ

Yenilenen dünya perspektifi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının daha çok kullanımı, enerji tüketim değerlerinin her geçen gün düşmesi ve küresel ısınmaya karşı yeşil enerji sloganı ile sürekli bu yönde gelişen teknoloji, geleceğimizi de bu yönde şekillendirmektedir. Bunun en büyük örneklerinden biri de elektrikli araçlardır. Bugün yaygın olmasa da çok popüler bir konumda olan ve gelecekte tamamen %100 elektrikli araç kullanımının olacağı düşünülen dünyamızda bu konuda sürekli yeni çalışmalar ve yeni projeler ortaya çıkmaktadır. Özellikle “0” karbon salınım değerlerine sahip ve içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla çok az bir yakıt maliyetine sahip olması elektrikli araçların en önemli avantajlarından biridir. Ancak, bu araçlar için halen birçok kısıt bulunmaktadır. Bu kısıtlara her geçen gün yeni çözümler sunulmaktadır. Ayrıca elektrikli araçların geliştirilmeye açık birçok yönü de bulunmaktadır. Bunlardan biri de elektronik diferansiyel konusudur.

Geleneksel araçlarda büyük bir motor ve bu motordan alınan gücü tekerleklere aktaran bir diferansiyel mekanizması mevcuttur. Bu mekanizma sorunsuz şekilde çalışabilmektedir ancak hem büyük bir yer işgal etmesi, hem de ağır olması bu mekanizmanın dezavantajlarıdır. Geleneksel araçlarda içten yanmalı motor kullanıldığından bugüne kadar mekanik diferansiyele bir alternatif geliştirilmemiştir. Ancak elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarının birçok çeşitte ve boyutlarda bulunabilirliğinden dolayı ve ayrıca içten yanmalı motorlara kıyasla daha iyi kontrol edilebilmeleri nedeniyle bir esneklik söz konusudur. Bu esneklik de bize güç aktarımına bile ihtiyaç duymadan elektrik motorlarını doğrudan olarak aracın hareket sistemine (tekerleklere HUB motor olarak) yerleştirilebilme olanağı tanır. Bu sayede araç, üzerindeki çok büyük bir metal kütlelerinden kurtulmuş olur ve büyük ölçüde hafifler. Bu avantaj da aynı zamanda kayıpların azalmasını sağlamaktadır. Yalnız aracın hareket sistemine direkt olarak yerleştirilen bu motorların kontrol yardımı ile geleneksel araçlarda bulunan diferansiyel mekanizmasının yaptığı işlevi yapması gerekmektedir.

# Efficiency Challenge Electric Vehicle

## 1.1 Diferansiyel Mekanizmasının Tarihsel Gelişimi

Tarihten günümüze ilk ilkel araç olan at arabası aslında diferansiyel mekanizmasının gelişiminin temelini oluşturmaktadır. İlk zamanlarda at arabalarında dönüş esnasında çok zorluklar yaşanmaktaydı. Daha sonra dönüşleri iyi yapabilmeleri için ön tekerleklerin dönmesi gerektiği düşünüldü. Şekil 1.1’de görülen at arabasının viraj esnasında ön tekerleklerinin bir bütün olarak nasıl döndüğü görülebilmektedir.



*Şekil 1.1 Viraj esnasında at arabası*

etmesi gereken yol iç tekerleğe göre daha fazla olmaktadır.



*Şekil 1.2 Viraj esnasında iç ve dış tekerleğin kat ettiği yol*

problemlerin hepsini çözebilen modern diferansiyel mekanizması geliştirildi.

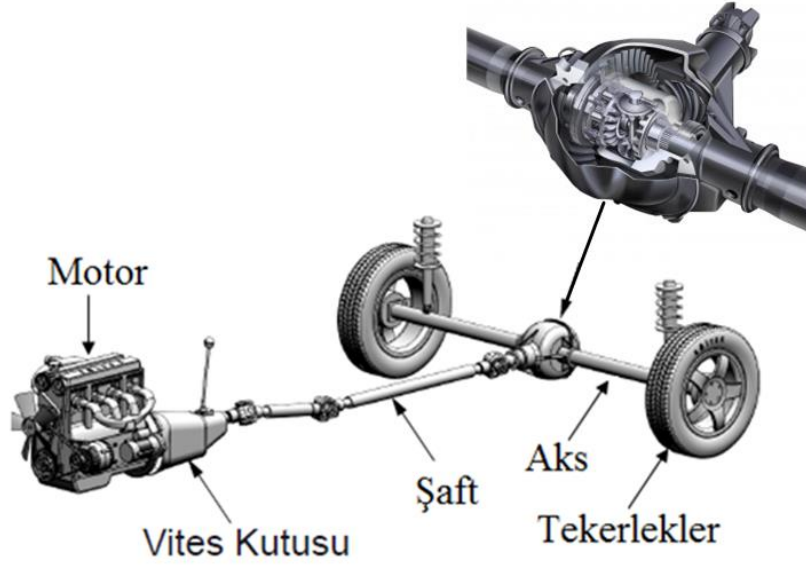
Bundan sonra modern arabaların temelini oluşturan şasi, şaft ve aks mekanizmaları ile içten yanmalı araçlar ortaya çıktı. Bunlardaki sorun ise tahrik sisteminin aracın içerisinde olmasından dolayı ayrı bir direksiyon kumanda sistemine ihtiyaç duymaları idi. Ancak burada da başka bir problem ortaya çıkıyordu. Viraj esnasında iç ve dış tekerleklerin farklı hızlarda dönmeye zorlanmaları. Şekil 1.2’de de görüldüğü üzere viraj esnasında dış tekerleğin kat

Bu problem ilk araçlarda tahrik sisteminin sadece bir tekere bağlanması ile çözüm bulmuştur. Yani 4 tekerlekli bir araçta, motor sadece tek bir tekere tahrik vermektedir. Tabi ki bu da çok kararlı bir sistem değildir. Daha sonra bu

## 1.2 Modern Diferansiyel Mekanizması

Modern diferansiyel mekanizması, içerisinde birçok dişli sisteminin var olduğu, aynı zamanda bir güç dağıtım elemanı ve kararlı dönüş sağlayabilen bir mekanizma olarak geliştirilmiştir.

Diferansiyel mekanizması en temel olarak şaftla aks arasında bulunan bir güç aktarma organıdır. Şekil 1.3'de arkadan itişli 2 tekerlekten tahrikli bir araçta diferansiyelin yeri açıkça görülebilmektedir.



Şekil 1.3 Araç Aktarma Organları

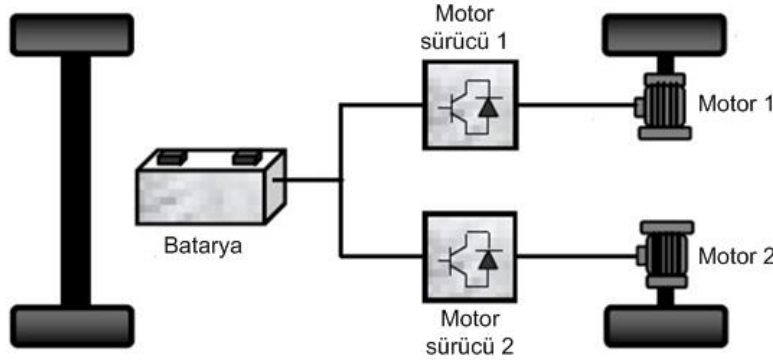
Diferansiyel mekanizmasının görevleri şu şekilde sıralanabilir;

- Şafttan gelen hareketin hızını düşürerek momentini artırır.
- Virajlarda iç tekerin yavaş dış tekerin daha hızlı dönmesini sağlayarak tekerleklerin sürtünmeden ve aracın savrulmadan rahat viraj almasını sağlar.

Diferansiyelin bu görevlerinden bizim için önemli olan viraj durumudur. Araç herhangi bir viraja girdiğinde iç tekerin yavaş, dış tekerin ise hızlı dönmesi istenir. Viraj durumunda diferansiyel içerisindeki dişli mekanizmaları yardımı ile yola aktarılan güç düşük momentli tekerleğe göre ayarlanır ve bu sayede iç tekerlek yavaşlamaya zorlandığı için momentini artırır, dış tekerleğin ise iç tekerleğe göre momentini daha az olduğu için momentlerinin tersi oranında hızlarla tekerlekler dönerek kararlı bir viraj karakteristiği sunmaktadır.

## 1.3 Elektrikli Arabalarda Diferansiyel Mekanizması

Günümüz elektrik arabaları hala konsept çerçevesinde olduğundan kıstas almak çok doğru olmasa da şu anda çeşitli uygulamalar mevcuttur. Geleneksel sistemlere benzer tek büyük bir elektrik motoru ve standart aktarma organlarının içerisinde diferansiyel mekanizmasının da bulunduğu elektrikli araçlar da mevcuttur, 4 tekerleğinde 4 ayrı elektrik motoru bulunan ve aktarma organı hiç bulunmayan araçlar da mevcuttur. Ama daha önce de bahsedildiği gibi daha küçük boyutta 2 ya da 4 motor kullanmanın çok daha avantajlı bir sistem olduğu aşikârdır. Şekil 1.4'de 2 motorlu iki araç için blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 1.4 Elektronik Diferansiyel

Birden fazla (2 veya 4) elektrik motoru kullanılan elektrikli araçlarda mekanik bir diferansiyel mekanizması olmadığı için bu işlemin elektronik olarak, motorlar kontrol edilerek yapılması gerekmektedir.

## 1.4 Elektronik Diferansiyel

İlk olarak elektronik diferansiyel kontrol sistemini anlamak için şartlar ve kısıtlar belirlenmelidir. Bunun için de mekanik olarak diferansiyel sisteminin hangi şartlarda ve bu işi nasıl yaptığının detaylı olarak tekrar incelenmesi gerekir. Bu şartların en önemlisi;

- Mekanik sistemin moment kontrol temelli bir sistem olduğu ve viraj esnasında moment dengesi kurularak düşük momente ihtiyaç duyan tekerin daha çok dönmesi sağlanarak virajın kararlı bir şekilde alınabilmesidir.

Elektronik diferansiyel uygulamasında da mekanik diferansiyele benzer yaklaşım yapmak söz konusu olabilir. Hatta akla ilk gelen yöntem de budur. Bu yöntemde tahrik edilecek tekerleklerin

# Efficiency Challenge Electric Vehicle

momenti ölçülerek aynen mekanik sistemdeki gibi ters orantılı bir güç dağıtımı, dolayısı ile hız oranının istenildiği gibi kararlı bir dönüş yapmayı sağlayacak şekilde ayarlanması sağlanabilir.

Gelişmiş bir elektronik diferansiyel kontrol ünitesi;

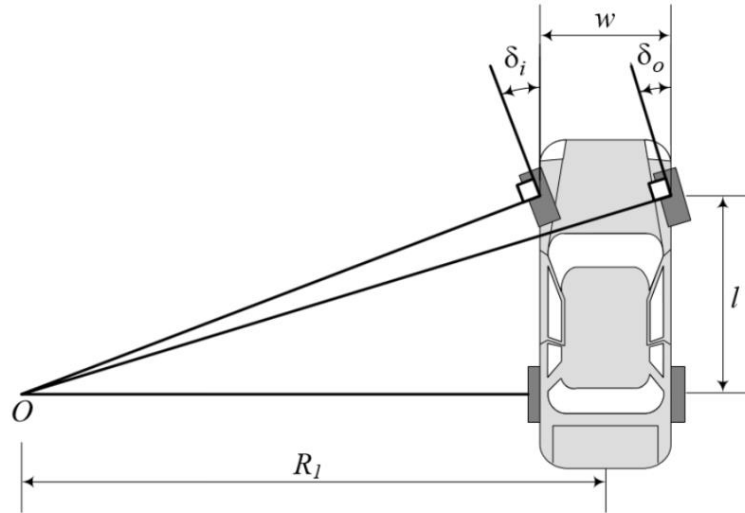
- *Viraj esnasında dönüş tekerlerinin hız farkını uygun olarak düzenlemeli,*
- *Düz gidilmek istendiğinde yoldan sapma yapmaması,*
- *Her iki tekerleğin farklı yol şartlarında düz giderken doğrultuyu koruması ve iki tekerlek arasındaki hız farklarını (patinaj durumunun) tolere edebilmesi,*
- *Bozuk yolda hareket ederken doğrultunun saptmadan ilerleyebilmesinin sağlanması.*

Yukarıdaki dört durum da sağlandığı takdirde güzel bir kontrol sağlanmış denebilir.

## 2 ARACIN VİRAJ DÖNÜŞ DİNAMİKLERİNİN İNCELENMESİ

### 2.1 Dönüş Kinematığı

Sola dönen 4 tekerlekli bir araç düşünülürse Şekil 2.1'de üzerinde dönüş parametreleri de görülecek şekilde bulunmaktadır. Araç sola doğru çok yavaş bir hızla döndüğü varsayılırsa araçta kayma olmadığı düşünülebilir ve dönüş esnasında iç ve dış tekerlek arasındaki kinematik açıklanabilir. Bu geometri aynı zamanda *Ackerman Geometrisi* olarak da bilinmektedir ve şu şekilde ifade edilmektedir.

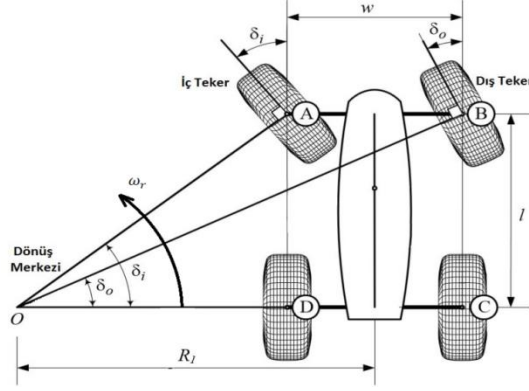


Şekil 2.1 Ön tekerlekten dönüş yapan bir aracın Ackerman Geometrisi parametreleri

Burada dönebilen tekerlekleri taşıyan aksın uzunluğu ya da sürüş izi " $w$ " olarak gösterilmiştir. Ön ve arka aks arasındaki mesafe, dingil mesafesi ise " $l$ " ile gösterilmektedir. Araç izi ve dingil mesafesi kinematik incelemede aracın karakteristiğini gösteren ana parametrelerdir. Kinematik analiz için araç eni ve boyu olarak da kabul edilmektedir.

## Efficiency Challenge Electric Vehicle

Şekil 2.2 de gözüktüğü üzere sola dönüş yapan ve dönüş merkezi  $O$  olan bir aracın iç teker dönüş açısı  $\delta_i$  ve dış teker dönüş açısı  $\delta_o$  arasındaki bağıntı şu şekilde ifade edilebilir.



Şekil 2.2 İç ve Dış tekerlek dönüş açılarının analizi

Şekildeki  $OAD$  ve  $OBC$  üçgenleri kullanılırsa;

$$\tan \delta_i = \frac{l}{R_1 - \frac{w}{2}} \quad [1]$$

$$\tan \delta_o = \frac{l}{R_1 + \frac{w}{2}} \quad [2]$$

Denklemleri elde edilir.

Buradan  $R_1$  elde edilecek olursa;

$$R_1 = \frac{w}{2} + \frac{l}{\tan \delta_i} \quad [3]$$

$$R_1 = -\frac{w}{2} + \frac{l}{\tan \delta_o} \quad [4]$$

Buradan da iki  $R_1$  in eşitliğinden  $\delta_i$  ve  $\delta_o$  arasındaki bağıntı bulunabilir;

$$\delta_o = \tan^{-1} \left( \frac{l}{w + \frac{l}{\tan \delta_i}} \right) \quad [5]$$

## Efficiency Challenge Electric Vehicle

*Ackerman Geometrisi* ile iç ve dış tekerlek arasındaki dönüş açıları farklılıklarının ifadesi çıkartıldığına göre şimdi dönüş esnasında bu tekerleklerin arasındaki açısal hız farkının bulunması gerekir. Bunun için de yine Şekil 2.2 üzerindeki parametreler ile şu ifadeler yazılabilir:

Burada  $\omega_r$  aracın dönüş merkezine göre açısal hızı olarak tanımlanmaktadır. Şekil üzerinde *OAD* üçgenine göre *OA* uzunluğu  $R_i$  ve *OBC* üçgeninde *OB* uzunluğu da  $R_o$  olarak tanımlanırsa; aracın dönüş tekerleklerinin arasındaki hız farkı bu yarıçaplar ile orantılı olacaktır. Ayrıca  $\omega_i$  ve  $\omega_o$  aracın iç ve dış tekerleğinin açısal hızı ve  $R_w$  ise pnömomatik tekerleğin yarıçapı olarak tanımlanmıştır. Bu parametrelerle ifadeler yazılırsa;

$$\omega_i \times R_w = \omega_r \times R_i \quad [6]$$

$$\omega_o \times R_w = \omega_r \times R_o \quad [7]$$

Bu ifadelerdeki  $R_i$  ve  $R_o$  ifadeleri yerine de *OAD* ve *OBC* üçgenlerinden değerleri yazılırsa;

$$R_i = \frac{l}{\sin \delta_i} \quad [8]$$

$$R_o = \frac{l}{\sin \delta_o} \quad [9]$$

$R_i$  ve  $R_o$  [6] numaralı denklemlerde yerine yazılıp iç ve dış tekerlek hızları birbirine oranlanırsa;

$$\frac{\omega_i}{\omega_o} = \frac{\sin \delta_o}{\sin \delta_i} \quad [10]$$

İfadesi elde edilir. Bu ifadeye göre arkadan itişli ve ön tekerlekten doğrultu kontrollü bir araç için düz yolda giderken tahrik tekerlekleri aynı açısal hızda dönecekler ve doğrultu tekerleklerinin açısı ise “0” derece olacaktır. Araç viraja girdiği anda viraja göre içeride kalan tekerlek yavaşlaması gerekecek ve dışarıda kalan teker hızlanması gerekecektir. Aracın tahrik sisteminin bulunduğu arka tekerleklerdeki motorlar dönüş ekseninin tabanını oluşturduğundan ve aracın da ağırlık merkezinin bu iki tahrik tekerinin ortasında olduğu düşünülürse iç ve dış tekerlekler arasındaki açısal hız farkları eşit olacaktır. Aracın düz yolda her iki tekerleğin de  $\omega$  açısal hızında döndüğünü varsayarsak, dış tekerin açısal hızı  $\omega_o = \omega + x$  kadar ve iç tekerleğin açısal hızı da  $\omega_i = \omega - x$  kadar



$$\frac{\omega + x}{\omega - x} = \frac{\sin \delta_i}{\sin \delta_o} \quad [11]$$

olmalıdır. Bu yaklaşımla ifade tekrar güncellenirse;

Bu ifadeden  $x$  elde edilirse araç viraja girdiği anda iç ve dış tekerleğin açılma hızlarının ne kadar değişim gösterdiğinin matematiksel olarak ifadesi elde edilmiş olur.

$$x = \omega \times \left( \frac{\sin \delta_i - \sin \delta_o}{\sin \delta_i + \sin \delta_o} \right) \quad [12]$$

### 3 KAYNAKÇA

[1] Kada HARTANI1, Mohamed BOURAHLA, Yahia MILOUD1, Mohamed SEKOUR “Electronic Differential with Direct Torque Fuzzy Control for Vehicle Propulsion System” Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.17, No.1, 2009, TUBITAK doi:10.3906/elk-0801-1.

[2] Abdelhakim Haddoun, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Senior Member, IEEE, Demba Diallo, Senior Member, IEEE, Rachid Abdessemed, Jamel Ghouili, and Kamel Srairi “Modeling, Analysis, and Neural Network Control of an EV Electrical Differential” IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 55, NO. 6, June 2008.

[3] Bekheira Tabbache, Abdelaziz Kheloui, and Mohamed El Hachemi Benbouzid, Senior Member, IEEE “An Adaptive Electric Differential for Electric Vehicles Motion Stabilization” IEEE Transactions On Vehicular Technology, VOL. 60, NO. 1, January 2011.

[4] J. Wang, Q. Wang, L. Jin, C. Song “Independent Wheel Torque Control of 4WD Electrical Vehicle for Differential Drive Assisted Steering” State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, No.5988, Renmin Street Jilin China.

[5] R. Kandiban, R. Arulmozhiyal “Speed Control of BLDC Motor using Adaptive Fuzzy PID controller” International Conference of Modelling, Optimization of Computing 2012.

## Efficiency Challenge Electric Vehicle

---

- [6] Swiss Federal Institute of Technology Zurich “Steering Dynamics and Steering Theory”, Vehicle Dynamics and Design Ders Notları
- [7] Yee-Pien Yang, Member, IEEE , Xian-Yee Xing, “Design of Electric Differential System for an Electric Vehicle with Dual Wheel Motors”, Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control Cancun, Mexico, Dec. 9-11, 2008
- [8] Abdelfatah Nasri, Abdeldjebar Hazzab, Ismail K. Bousserhane, Samir Hadjeri, Pierre Sicard, “Two Wheel Speed Robust Sliding Mode Control for Electric Vehicle Drive”, SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING Vol. 5, No. 2, November 2008, 199-216.