

Sistema de Torque Vectoring basado en Técnicas de Control Inteligente para vehículos eléctricos con motores en rueda

Alberto Parra ^a, Asier Zubizarreta ^b, Joshué Pérez ^a.

^a Tecnia Research & Innovation, Industry and Transport Division, Spain

^b Dept. of Automatic Control and System Engineering, University of the Basque Country (UPV/EHU)
Faculty of Engineering of Bilbao, Spain

Resumen

La electrificación en el transporte es actualmente una prioridad tanto para los fabricantes como para los organismos públicos. El desarrollo de vehículos eléctricos es un aspecto clave en esta estrategia, existiendo una necesidad de seguir investigando en el aumento de la eficiencia y el comportamiento dinámico de estos vehículos. A tal fin, el desarrollo de sistemas de ayuda a la conducción (ADAS) adaptados a las topologías multimotor que ofrecen los vehículos eléctricos es fundamental. En este trabajo se propone un sistema de Torque Vectoring basado en técnicas inteligentes que combina un estimador neuro borroso para las fuerzas verticales en los neumáticos y un controlador borroso para el control del momento de rotación del vehículo. El algoritmo propuesto es comparado con controladores tradicionales a través de un simulador de dinámica vehicular de alta fidelidad. Los resultados demuestran que el controlador es capaz de mejorar el comportamiento dinámico del vehículo y aumentar un 10% su eficiencia.

Palabras clave: Torque Vectoring, Dinámica Vehicular, Vehículo Eléctrico .

1 Introducción

En los últimos años el desarrollo de los vehículos eléctricos ha crecido enormemente para dar respuesta a los problemas energéticos y medioambientales [1] [8], convirtiéndose en una de las principales áreas de investigación dentro de la industria de la automoción.

Uno de los pilares sobre los que se sustenta la movilidad eléctrica es la reducción de emisiones. En este aspecto, los vehículos con motores tradicionales de combustión interna (ICE) se están encontrando cada vez con más dificultades debido a las exigentes regulaciones de emisiones que se están estableciendo.

Por otro lado, los sistemas de tracción eléctricos ofrecen más ventajas, además de la reducción en emisión de gases contaminantes y de la mejora de

la eficiencia, como son una respuesta suave y precisa, que a su vez significa una mayor controlabilidad [25]. De igual modo, es posible implementar varias topologías de sistema de tracción, desde un único motor eléctrico junto a un sistema de transmisión acoplado a un diferencial mecánico, hasta la topología llamada "motor en rueda", que consiste en el montaje de pequeños motores eléctricos en las ruedas, de alta velocidad y bajo par, acoplados a un sistema de transmisión. De este modo, los grados de libertad sobre los que se puede actuar en el vehículo aumentan, posibilitando implementar algoritmos de control avanzado de par que mejoren el comportamiento dinámico del vehículo [10]-[13].

Entre estos algoritmos, uno de los más importantes y que mejores resultados ofrece es el llamado "Torque Vectoring". Este sistema trata de mejorar el comportamiento dinámico del vehículo a través de un óptimo reparto de par en las ruedas motrices. Para este propósito, tres distintas estrategias pueden llevarse a cabo [22]. La primera de ellas está basada en una óptima distribución de par en las ruedas motrices [6]; la segunda de ellas se basa en utilizar un sistema que controle el ángulo roll (en torno al eje longitudinal del vehículo) del vehículo para variar la carga vertical en los neumáticos [25] [14]; mientras que la tercera opción está basada en incorporar un sistema de dirección en ambos ejes del vehículo. Este trabajo se centrará en la primera de las opciones al haberse seleccionado un vehículo con tracción en las cuatro ruedas como caso de estudio.

Los algoritmos de reparto de par han sido desarrollados tradicionalmente utilizando distintas técnicas de control. Desde las más tradicionales, como los basados en un controlador tipo PID [6], hasta sistemas más sofisticados, como los que están basados en algoritmos de control predictivo basado en modelo (MPC) [23] o en control deslizante de segundo orden (SOSMC) [10]. Estos últimos proporcionan mejores resultados, aunque su coste computacional es mayor que el de los algoritmos basados en controladores PID. Por otro lado, también las técnicas de control inteligente han tratado de solventar la problemática que pre-

senta este sistema. Entre las distintas técnicas de control inteligente, las más utilizadas han sido las basadas en Redes Neuronales [11] y en Lógica Difusa [13], demostrando un buen rendimiento con un bajo coste computacional, lo que ha convertido a este tipo de algoritmos en una alternativa a tener en cuenta para el diseño de sistemas de "Torque Vectoring".

En cualquier caso, con el fin de generar una correcta distribución del par en las ruedas motrices, es crucial conocer las fuerzas de interacción entre las ruedas y el asfalto [20]. Sin embargo, la medición directa de estas variables es una tarea complicada, y por lo tanto, se hace necesario la implementación de estimadores. No obstante, esta problemática no es siempre considerada en los trabajos hallados en la literatura, donde la mayoría de ellos cuentan con estimadores perfectos, lo cual no supone un escenario real.

Entre las soluciones propuestas para la estimación de las fuerzas en los neumáticos, la más común se basa en estimadores basados en el modelo del neumático, ya sea lineal [14], el modelo de Dugoffs, o en modelos semiempíricos como el de Pacejka [18]. La mayor desventaja de estas soluciones es que dependen de un modelo y por lo tanto están sujetos a incertidumbres en éste. Es más, muchos de los estimadores se basan en el uso de variables que son difícilmente medibles, lo que dificulta su implementabilidad [20].

Con el objetivo de solventar estos problemas, este trabajo presenta un sistema de Torque Vectoring compuesto en primer lugar por un estimador neuro-borroso de las fuerzas verticales de los neumáticos basado exclusivamente en variables medibles, y en segundo lugar, por un controlador borroso que controla el momento sobre el eje vertical del vehículo (Yaw Moment). El sistema propuesto no sólo es capaz de mejorar el comportamiento dinámico del vehículo, sino también de mejorar su eficiencia gracias a la óptima distribución de par que se obtiene de la combinación de los dos subsistemas mencionados. Con el fin de evaluar su eficiencia, el sistema propuesto será validado en el simulador de alta fidelidad Dynacar, usando un vehículo de clase E y comparando los resultados con los de otros controladores de la literatura.

El resto del artículo está dividido de la siguiente manera. En la sección 2 se detalla el algoritmo propuesto. En la sección 3 se explica el entorno de simulación. En la sección 4 se explican los resultados obtenidos en las simulaciones. Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones principales.

2 Sistema de Torque Vectoring Inteligente

En esta sección se detalla el sistema de Torque Vectoring Inteligente desarrollado. Su propósito principal es distribuir el par motor entre las diferentes ruedas motrices, con el objetivo de mejorar el comportamiento dinámico y la estabilidad del vehículo. Se puede dividir en 5 subsistemas (Figura 1): La distribución de par lateral se lleva a cabo utilizando el Controlador difuso de momento de Yaw, cuya referencia se calcula usando un Generador de Referencia de Yaw Rate; el reparto de par longitudinal es proporcionado por un algoritmo que tiene en cuenta la distribución de pesos a través de la estimación de las fuerzas verticales en los neumáticos calculada por el estimador neuro-borroso desarrollado. Finalmente ambas distribuciones de par, lateral y longitudinal, son procesadas para generar la distribución de par final.

2.1 Generador de referencia de Yaw Rate

Como ya se ha mencionado recientemente, el sistema de Torque Vectoring desarrollado proporciona una distribución de par lateral y otra longitudinal. La primera de ellas está basada en el control del momento de yaw del vehículo, por lo tanto, es necesario contar con una referencia apropiada de yaw rate para un buen funcionamiento.

Para el cálculo del yaw rate deseado, es necesario contar con un modelo. En este caso se ha utilizado el comúnmente conocido modelo de bicicleta [26]. Este modelo proporciona un buen equilibrio entre precisión y eficiencia computacional. Con el objetivo de incrementar esta eficiencia, se han asumido las siguientes simplificaciones adicionales: se considera que el centro de gravedad se encuentra a altura nula, la variación de las fuerzas verticales en los neumáticos no se tendrán en cuenta, solamente se consideran ángulos de deslizamiento lateral pequeños y los coeficientes de rigidez de los neumáticos se consideran constantes (zona lineal de los neumáticos).

Se debe mencionar que este modelo de reducida complejidad es utilizado exclusivamente para la ejecución del controlador en tiempo real. Además, algunas de las simplificaciones mencionadas son razonables para vehículos de calle, ya que estos no suelen ser llevados hasta su límite.

De esta forma, la ecuación de yaw rate de referencia es la siguiente [17]

$$\dot{\psi}_{ref} = \frac{V}{L + \frac{m}{L} \left(\frac{b}{C_{\alpha F}} - \frac{a}{C_{\alpha R}} \right)} V^2 \delta \quad (1)$$

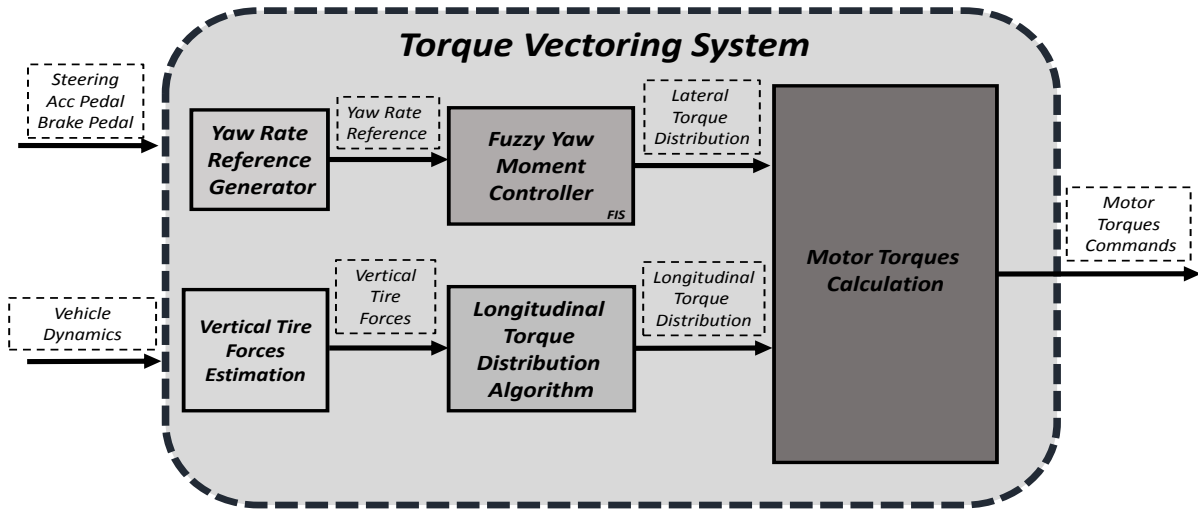


Figura 1: Sistema de Torque Vectoring Propuesto

donde m es la masa total del vehículo en el centro de gravedad del mismo, a y b son las distancias al centro de gravedad del eje delantero y trasero respectivamente, L es la distancia entre ejes, δ es el ángulo de giro de las ruedas delanteras, $C_{\alpha F}$ y $C_{\alpha R}$ son los coeficientes de rigidez lateral de las ruedas delanteras y traseras respectivamente, y V es la velocidad del vehículo.

Por razones de seguridad, es necesario limitar esta referencia. En este caso, el límite se ha establecido de la siguiente manera [6].

$$\left| \dot{\psi}_{ref,max} \right| = \left| \frac{a_y}{V} \right| \quad (2)$$

donde a_y es la aceleración lateral del vehículo.

2.2 Controlador difuso del momento de Yaw

El controlador difuso de momento de yaw proporciona la distribución lateral (τ_{lat}) de par del vehículo. Por lo tanto, considerando el yaw rate del vehículo y el ángulo de deslizamiento lateral, este sistema calcula el porcentaje de par a aplicar a cada lado del vehículo. De esta forma, si $\tau_{lat}=0$ todo el par será aplicado al lado derecho del vehículo, y si $\tau_{lat}=1$ todo el par será aplicado por las ruedas del lado izquierdo. Este subsistema está basado en Lógica Difusa, que es una extensión de la Lógica Booleana de Lofti A. Zadeh en 1965 [26].

Esta técnica habilita la abstracción del modelo y de formulación matemática pudiendo traducir el conocimiento del diseñador en reglas, sin renun-

ciar a un considerable nivel de capacidad de ajuste fino del controlador.

Para poder calcular el porcentaje de par a aplicar a cada lado del vehículo, el controlador necesita tres entradas: el error de yaw rate, su derivada y el error de ángulo de deslizamiento lateral. Las dos primeras entradas son calculadas considerando la referencia detallada en la subsección anterior, mientras que el error del ángulo de deslizamiento lateral se calcula considerando que su referencia es cero, para así reducir su valor real y así conseguir una conducción más neutra.

El valor actual de esta variable es calculado de la siguiente forma [6]:

$$\beta = \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \quad (3)$$

donde, V_y y V_x son las velocidades en los ejes locales longitudinal (x) y lateral (y).

A continuación, en las Tablas 1 - 4 se muestran las distintas reglas implementadas, junto con sus respectivos acrónimos.

2.3 Estimador neuro-borroso de fuerzas verticales en los neumáticos

El comportamiento dinámico de un vehículo depende en gran medida de las fuerzas en los neumáticos. Sin embargo, su estimación es una de las tareas más complicadas dentro de la dinámica vehicular. Y, además, su medición no siempre es posible debido a la dificultad que entraña.

En esta sección, se propone un novedoso estimador

Tabla 1: Membership Functions Names.

Nombres	Descripción
NVL	NEGATIVE VERY LARGE
NL	NEGATIVE LARGE
NM	NEGATIVE MEDIUM
NS	NEGATIVE SMALL
ZE	ZERO
PS	POSITIVE SMALL
PM	POSITIVE MEDIUM
PL	POSITIVE LARGE
PVL	POSITIVE VERY LARGE

Tabla 2: Reglas para valores negativos de error de la derivada del yaw rate

$\dot{e}(\psi) < 0$	$e(\psi)$					
	NL	NS	ZE	PS	PL	
NL	ZE	NS	NM	NL	NVL	
NS	ZE	ZE	NS	NM	NL	
ZE	ZE	ZE	ZE	NS	NL	
PS	PM	PS	ZE	ZE	NS	
PL	PL	PM	PS	ZE	ZE	

Tabla 3: Reglas para valores nulos de error de la derivada del yaw rate

$\dot{e}(\psi) = 0$	$e(\psi)$					
	NL	NS	ZE	PS	PL	
NL	ZE	NS	NM	NL	NVL	
NS	PS	ZE	NS	NM	NL	
ZE	PM	PS	ZE	NS	NM	
PS	PL	PM	PS	ZE	NS	
PL	PVL	PL	PM	ZE	ZE	

Tabla 4: Reglas para valores positivos de error de la derivada del yaw rate

$\dot{e}(\psi) > 0$	$e(\psi)$					
	NL	NS	ZE	PS	PL	
NL	ZE	ZE	NS	NS	NM	
NS	PS	ZE	ZE	NS	NS	
ZE	PM	PS	ZE	ZE	ZE	
PS	PL	PM	PS	ZE	ZE	
PL	PVL	PL	PM	PS	ZE	

neuro-borroso para las fuerzas verticales en los neumáticos, que se basa únicamente en la utilización de variables medibles, como el giro del volante o las velocidades/aceleraciones lineales, que pueden ser medidas usando IMUs o GPS.

Los datos utilizados para el entrenamiento del estimador han sido obtenidos a través de una simulación de una vuelta completa al circuito de Nurburgring (tiempo de simulación 800s y un periodo de muestreo de 50ms). Esta simulación ha sido realizada en el simulador de dinámica vehicular de

alta fidelidad Dynacar.

2.4 Algoritmo de distribución longitudinal de par

El algoritmo de reparto de par longitudinal propuesto calcula el porcentaje de par (τ_{long}) que debe proporcionar cada eje del vehículo considerando las fuerzas verticales en cada uno de ellos a través del estimador recientemente detallado. De esta forma, si $\tau_{long}=0$ todo el par será proporcionado por el eje trasero, y si $\tau_{long}=1$, todo el par lo proporcionarán las ruedas del eje delantero. Así, es posible que las ruedas con mayor agarre proporcionen un mayor porcentaje de par. Para ello, se ha desarrollado un algoritmo basado en la máxima carga que puede soportar un eje. De tal forma que,

$$\tau_{long} = \frac{f_{wheels}}{f_{max}} \quad (4)$$

donde f_{wheels} es la combinación de la fuerza vertical de ambas ruedas de cada eje, dada por el estimador desarrollado, y f_{max} es la máxima fuerza vertical que puede ser aplicada en un eje (considerando que toda la masa del vehículo está actuando en uno de los ejes). Para este estudio, este valor sería de 20208 N.

2.5 Cálculo de los pares motor

Este subsistema calcula el par exacto que se le comandará al motor de cada rueda τ_{ij} , basado en el par requerido por el piloto a través del acelerador τ , y la distribución de par longitudinal τ_{long} y lateral τ_{lat} .

$$\begin{aligned} \tau_{fl} &= \tau \tau_{long} \tau_{lat} \\ \tau_{fr} &= \tau \tau_{long} (1 - \tau_{lat}) \\ \tau_{rl} &= \tau (1 - \tau_{long}) \tau_{lat} \\ \tau_{rr} &= \tau (1 - \tau_{long}) (1 - \tau_{lat}) \end{aligned} \quad (5)$$

3 Entorno de Validación

En esta sección se explicará el entorno de simulación utilizado para la validación del sistema propuesto. La Figura 2 muestra el esquema general del concepto de control implementado. Se pueden identificar tres bloques principales. En primer lugar, está el bloque que proporciona los comandos del piloto, los cuales son generados por un algoritmo de conductor automatizado que trata de simular el comportamiento de un piloto real, garantizando que cada prueba se realiza en las mismas condiciones y eliminando el factor humano. Posteriormente, tenemos el sistema de

Torque Vectoring propuesto. Y, finalmente, se encuentra el modelo de vehículo, encargado de simular la dinámica del mismo, utilizando el simulador de dinámica vehicular Dynacar [7].

Este simulador de vehículos ha sido validado a través de exigentes pruebas con vehículos reales [3] - [5] y puede ser utilizado como entorno de simulación en entornos "Model in the loop" (MiL), para evaluar el funcionamiento de distintos sistemas de control para automoción.

El modelo físico de este simulador es un modelo multicuerpo y ha sido desarrollado en código C para posteriormente poder integrarlo en Simulink. Se trata de un modelo que se ejecuta en tiempo real, con un paso de tiempo de 1ms. Para el modelo de neumático se ha utilizado el comúnmente conocido modelo de Pacejcka [18], el cual es ampliamente utilizado en la industria de la automoción.

La Tabla 5 muestra las principales características del vehículo seleccionado.

Tabla 5: Características principales del vehículo.

Masa [kg]	1830
Ix [kgm ²]	928.1
Iy [kgm ²]	2788.5
Iz [kgm ²]	3234.0
Batalla [m]	3.05
Ancho Vía Delantera [m]	1.6
Ancho Vía Trasera [m]	1.6

4 Resultados

En esta sección se ha evaluado el funcionamiento del sistema de Torque Vectoring propuesto, comparándolo con un algoritmo de TV basado en PID [6].

Para poder evaluar la habilidad para mejorar el comportamiento dinámico del vehículo del sistema de TV desarrollado se ha escogido una maniobra exigente desde el punto de vista de la dinámica vehicular, como es el llamado Skid-Pad [9] (Figura 3). En las Figuras 5 - 9 se muestran los resultados de tres experimentos: cuando el sistema de Torque Vectoring no está activo, el basado en PID y el propuesto en este trabajo.

Se puede apreciar como el vehículo no es capaz de seguir la trayectoria deseada cuando no están activados los sistemas de TV, debido al subviraje que está sufriendo, mientras que cuando este sistema se activa, ya sea el propuesto en este trabajo como el presente en la literatura, el vehículo es capaz de realizar la prueba correctamente.

Este comportamiento subvirador circulando a la

velocidad crítica de 47km/h puede apreciarse aún mas en las figuras 5 y 6, las cuales muestran el deslizamiento longitudinal (slip ratio) y el ángulo de deslizamiento lateral (slip angle) de las ruedas delanteras. Estas muestran como, para el caso en el que el TV está desactivado, las ruedas delanteras no pueden transmitir toda la fuerza que se requiere por el piloto, lo que se traduce en valores altos de slip ratio y slip angle. Sin embargo, cuando ambos sistemas de TV son activados estos valores son reducidos en un 19% y en 23°, lo que se traduce en una mayor fuerza de tracción en los neumáticos. Esto implica una mayor velocidad en esta prueba, como se puede apreciar en la figura 7. Además, al eliminar el subviraje es posible alcanzar valores mayores de aceleración lateral y de yaw rate sin comprometer la estabilidad, como se muestra en las figuras 8 y 9.

Finalmente, también se ha realizado un análisis del impacto que este sistema tiene en el consumo energético del vehículo en esta prueba. Como se puede apreciar en la tabla 6, el sistema de TV propuesto, no sólo permite mejorar el comportamiento, como ya ha sido demostrado, sino que además es capaz de aumentar la eficiencia del vehículo en un 10%. Esto se debe a la óptima distribución de par resultante de la combinación del estimador de fuerzas verticales y del controlador del momento de Yaw, la cual permite destinar un mayor porcentaje de par a las ruedas con mayor tracción.

Tabla 6: Comparativa consumo Energía Mecánica

	Energía mec. [kWh]
TV OFF	0.4219
PID TV	0.2091
Intelligent TV	0.1895

5 Conclusiones

El diseño de sistemas de ayuda a la conducción que permitan no sólo mejorar el comportamiento dinámico, sino también la eficiencia del vehículo es un tema crucial en el desarrollo de los vehículos eléctricos con sistemas de tracción de varios motores. En este trabajo se ha presentado un sistema de Torque Vectoring compuesto por un estimador neuro-borroso de las fuerzas verticales en los neumáticos y por un controlador borroso para el momento de yaw del vehículo. De esta forma el sistema propuesto es capaz de considerar tanto la distribución de lateral de par, como la longitudinal.

Para la validación del sistema propuesto se ha realizado una maniobra muy exigente en el simu-

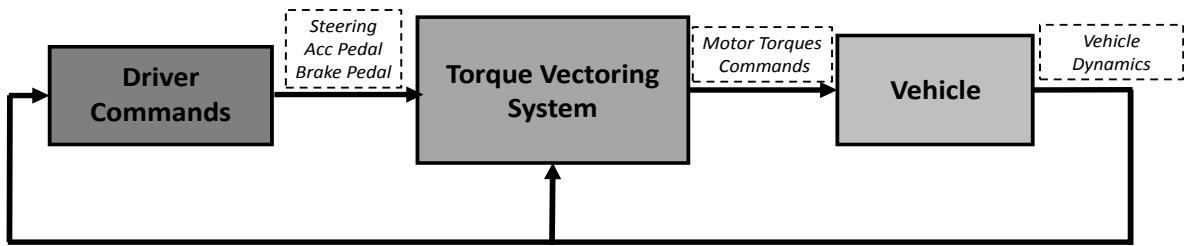


Figura 2: Entorno de validación]

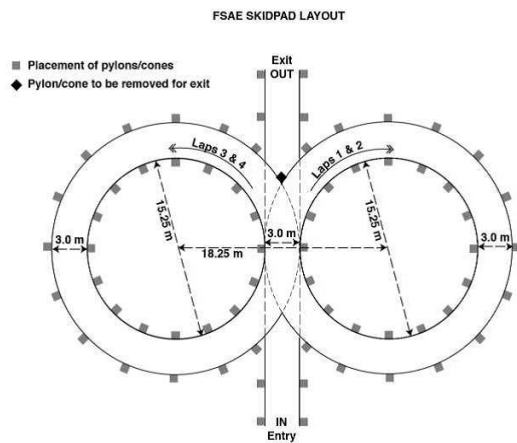


Figura 3: Prueba Skid Pad [9]

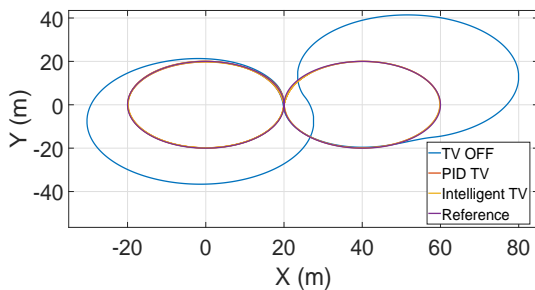


Figura 4: Trayectoria Skid Pad

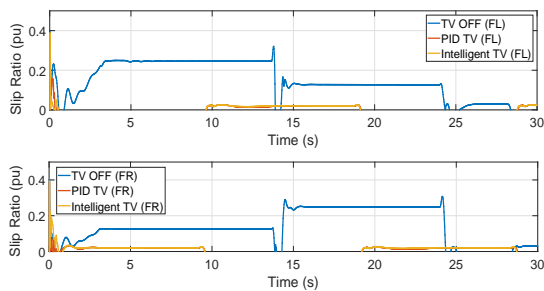


Figura 5: Slip Ratio de las ruedas

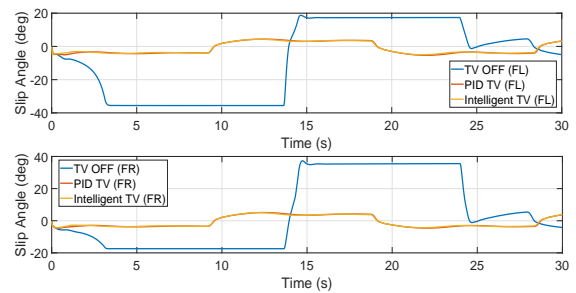


Figura 6: Slip Angle de las ruedas

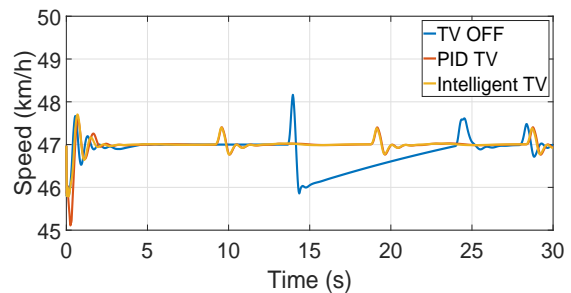


Figura 7: Velocidad del vehículo

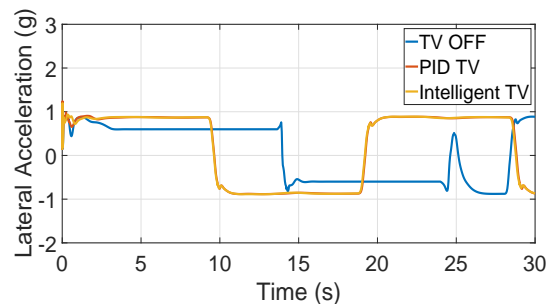


Figura 8: Aceleración lateral del vehículo

lador de alta fidelidad Dynacar. Los resultados han mostrado como el sistema propuesto no sólo es

capaz de mejorar el comportamiento dinámico del vehículo, reduciendo el subviraje y aumentando la estabilidad, sino que también permite mejorar la eficiencia del vehículo en un 10%.

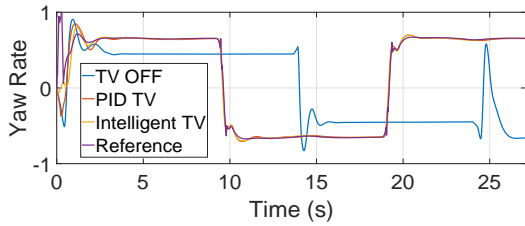


Figura 9: Seguimiento del Yaw Rate

English summary

TORQUE VECTORING SYSTEM BASED ON INTELLIGENT CONTROL TECHNIQUES FOR ELECTRIC VEHICLES WITH PER-WHEEL MOTORS

Abstract

Transport electrification is currently a priority for authorities, manufacturers and research centers around the world. The development of electric vehicles and the improvement of their functionalities are a key element in this strategy. As a result, there is a need for further research in emission reduction, efficiency improvement or dynamic handling approaches.

In order to achieve these objectives, the development of suitable Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS) is required. Although traditional control techniques have been widely used for ADAS implementation, the complexity of electric multi-motor powertrains make intelligent control approaches appropriate for these cases.

In this work, a novel intelligent Torque Vectoring (TV) system, composed by a neuro fuzzy vertical tire forces estimator and a fuzzy yaw moment controller, is proposed which allows to enhance the dynamic behaviour of electric multi-motor vehicles. The proposed approach is compared with traditional strategies using the high fidelity vehicle dynamics simulator Dynacar. Results show that proposed intelligent Torque Vectoring system is able to improve the handling and increase the efficiency of the vehicle by 10%.

Keywords: Torque Vectoring, Vehicle Dynamics, Electric Vehicle.

Referencias

- [1] ACEA, (2016) "European Automobile Manufacturers Association - New passenger car registrations by alternative fuel type in the European Union Q4 2015".
- [2] A. Rezaeian et al., "Novel Tire Force Estimation Strategy for Real-Time Implementation on Vehicle Applications," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 6, pp. 2231-2241, June 2015.
- [3] Cuadrado, J., Vilela, D., Iglesias, I., Martín, A., Peña, A., (2013) "A Multibody Model to Assess the Effect of Automotive Motor In-wheel Configuration on Vehicle Stability and Comfort", *ECCOMAS Multibody Dynamics 2013*.
- [4] Dendaluce, M., Allende, M., Pérez, J., Prieto, P., Martín, A., (2016) "Multi Motor Electric Powertrains: Technological Potential and Implementation of a Model Based Approach" *IECON 2016*.
- [5] Dendaluce, M., Iglesias, I., Martín, A., Prieto, P., Peña, A., (2016) "Race-Track testing of a Torque Vectoring Algorithm on a Motor-in-Wheel Car using a Model-Based Methodology with a HiL and Multibody Simulator Setup", *International Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- [6] De Novellis, L., Sorniotti, A., Gruber, P., Pennycot, A., (2014) "Comparison of Feedback Control Techniques for Torque-Vectoring Control of Fully Electric Vehicles" *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- [7] "Dynacar by Tecnalia." [Online]. Available: <http://www.dynacar.es/en/home.php>.
- [8] European Roadmap Electrification of Road Transport, ERTRAC.
- [9] <https://www.fsaonline.com/>
- [10] Haddoun, A., et al., (2006) "Sliding mode control of EV electric differential system," *Proc. ICEM, Chania, Greece*.
- [11] Haddoun, A., M. E. H. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili and K. Srairi, "Modeling, Analysis, and Neural Network Control of an EV Electrical Differential," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2286-2294, June 2008.

- [12] I. Yang, S. Byun, B. Seo, D. Lee and D. S. Han, "Integrated control systems of active front steering and direct yaw moment control using dynamic inversion," 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Gold Coast, QLD, 2013, pp. 1303-1306.
- [13] Jalali, K., Uchida, T., McPhee, J., and Lambert, S., (2009) "Integrated stability control system for electric vehicles with in-wheel motors using soft computing techniques", *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems*.
- [14] J. Kim, H. Lee, and S. Choi, "A robust road bank angle estimation based on a proportional-integral Hfilter," Proc. Inst. Mech. Eng. D, J. Autom. Eng., vol. 226, no. 6, pp. 779-794, Jun. 2012.
- [15] Milliken, D.L., Milliken, W.F., "Race Car Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, 1995.
- [16] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, "MANUAL DE CARRETERAS DISEÑO GEOMETRICO", 2014.
- [17] Nikowitz, M. "Advanced Hybrid and Electric Vehicles" in Springer, 2016.
- [18] Pacejka, H.B. "Tyre and Vehicle Dynamics", BH, 2005.
- [19] Peña, A., Iglesias, I., Valera, J.J., Martín, A., "Development and validation of Dynacar RT software, a new integrated solution for design of electric and hybrid vehicles", *EVS 26 (2012)*.
- [20] R. Ghandour, A. Victorino, M. Doumiati, and A. Charara, "Tire/road friction coefficient estimation applied to road safety," in Proc. 18th Mediterranean Conf. Control Autom. Congr., 2010, pp. 1485-1490.
- [21] R. Jayachandrana, S. DenisAshok, S. Narayanan, "Fuzzy Logic based Modelling and Simulation Approach for the estimation of Tire Forces", in *Procedia Engineering* Volume 64, 2013, pp. 1109-1118.
- [22] Shimada, K., Shibahata, Y. (1994), "Comparison of Three Active Chassis Control Methods for Stabilizing Yaw Moments", *SAE Technical Paper*.
- [23] Siampis, E., Velenis, E., Longo, S., (2015) "Model Predictive Torque Vectoring Control for Electric Vehicles Near the Limits of Handling" *European Control Conference*.
- [24] Wallentowitz, H., (2005) "Vertical and Lateral Dynamics of Passenger Vehicles", *Automotive Technology II, Institute of Automotive Engineering, Aachen University of Technology, Germany*.
- [25] Y. Hu, L. Yang, B. Yan, T. Yan and P. Ma, "An Online Rolling Optimal Control Strategy for Commuter Hybrid Electric Vehicles Based on Driving Condition Learning and Prediction," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4312-4327, June 2016.
- [26] Zadeh, L. (1965) 'Fuzzy Sets' *Information and Control*.



© 2018 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC 3.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>).