Comportamiento de vehículos eléctricos y sus accionamientos de tracción ante fallas en sensores

Por Facundo Aguilera, Pablo de la Barrera y Cristian De Angelo
Grupo de Electrónica Aplicada (GEA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto

Resumen

Se estudia el comportamiento de un vehículo eléctrico y su accionamiento eléctrico de tracción ante fallas en sus sensores. Para esto, se realizan simulaciones sobre un modelo de vehículo con tracción trasera, impulsada por una maquina de inducción. El accionamiento utilizado puede cambiar entre tres diferentes estrategias de control convencionales. Con esta configuración, se analiza el comportamiento de la dinámica longitudinal del vehículo y las variables eléctricas ante fallas en los sensores y cambios de estrategia de control. Finalmente, se presentan conclusiones para el diseño de una arquitectura tolerante a fallas.

1. Introducción

Los vehículos eléctricos (VE) utilizan accionamientos eléctricos (AE) en su sistema de tracción. Los AE están compuestos por una máquina eléctrica, un sistema de control, electrónica de potencia y sensores. Cuando alguno de los sensores falla durante el funcionamiento del VE, puede producirse una pérdida de control del vehículo y daños en los componentes del AE, poniendo en peligro la seguridad de las personas. Para reducir estos efectos, mejorando la confiabilidad y seguridad de los VE, se ha propuesto la tracción mediante AE tolerantes a fallas en sus sensores. En el presente trabajo se estudian AE con máquinas de inducción (MI), las cuales suelen ser utilizadas para la tracción de VE.

Las arquitecturas tolerantes a fallas en sensores para AE operan *online*, permitiendo mantener el control de velocidad o de par de la máquina aunque ocurra una falla en algún sensor. El funcionamiento de los accionamientos con MI tolerantes a fallas en los sensores puede resumirse como sigue. Luego de ocurrida una falla en un sensor, un sistema de detección e identificación de fallas advierte el problema y determina cuál fue el sensor que falló. Posteriormente, en función del sensor que falló, se produce una reconfiguración del sistema de control que permite mantener al accionamiento en funcionamiento. La forma de reconfiguración del control puede dividirse en tres tipos: usando un sensor diferente (redundancia de hardware); utilizando la información provista por un sensor virtual, como los valores estimados por un ob-

servador (redundancia de software); cambiando la estrategia de control de la MI por otra que no requiera la información del sensor con falla.

Cuando ocurre una falla en un sensor, el tiempo requerido para realizar la detección e identificación de la falla puede afectar el comportamiento del VE y causar daños en los componentes del AE. Asimismo, luego de ser identificada la falla, debe contemplarse cómo perjudica al comportamiento del VE la reconfiguración del sistema de control.

Con el objetivo de evaluar la importancia de estos factores, en el presente trabajo se realizan simulaciones de un VE con fallas en los sensores de su AE de tracción. Además, se analiza el efecto producido por la reconfiguración del AE, basada en un cambio de estrategia de control luego de ocurridas las fallas. Si bien ya han sido propuestos previamente AE con reconfiguración mediante cambio de estrategia de control para aplicaciones de VE, nunca se han presentado resultados de su incorporación en un modelo de vehículo o en un prototipo experimental.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el modelo de VE utilizado, en la sección 3 se describe su AE y en la sección 4 se presentan resultados de simulación.

2. Modelo del vehículo

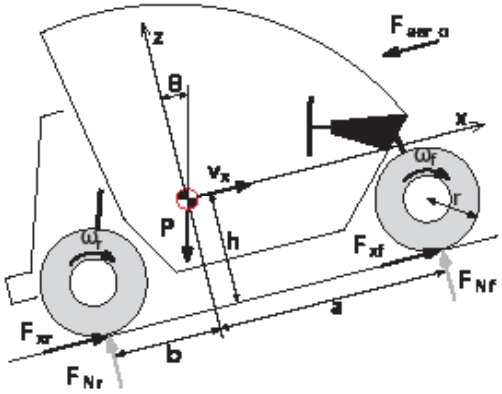
El modelo fue realizado en base al prototipo de vehículo desarrollado por el Grupo de Electrónica Aplicada y el Departamento de Mecánica de la Universidad Nacional de Río Cuarto. El mismo es un VE pequeño, de cuatro ruedas, con tracción trasera y con las prestaciones generales de un vehículo urbano para dos pasajeros. En la fig. 1(a) se muestra una fotografía del VE.

Para obtener el modelo se realizan las siguientes consideraciones:

- El chasis se considera como un cuerpo rígido;
- No se tiene en cuenta el efecto de la suspensión;
- Sólo se analiza la dinámica longitudinal;

En la fig. 1(b) se muestra la geometría del vehículo, donde a y b son las distancias longitudinales de las ruedas delanteras y traseras con respecto al centro de masa del vehículo, respectivamente; h es la distancia entre el suelo y el centro de masa; Θ es la inclinación de la ruta con respecto a la normal; r es el radio de las ruedas.

(a)



(b)

Figura 1: medidas del VEU.

A partir de las consideraciones mencionadas, la dinámica longitudinal del vehículo puede expresarse como:

$$\dot{v}_x = \frac{1}{m}\left(2F_{xr} + 2F_{xf} - F_{aero} - F_{rod}\right) \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J_r}\left(T_r - rF_{xr}\right) \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_f = \frac{1}{J_f}\left(-rF_{xf}\right) \quad (3)$$

donde los subíndices r y f denotan trasero y delantero, respectivamente; v_x es la velocidad longitudinal del chasis; ω_r y ω_f son las velocidades angulares de las ruedas traseras y delanteras, respectivamente; F_{xr} y F_{xr} son las fuerzas de tracción; F_{aero} y F_{rod} son las fuerzas de resistencia aerodinámicas y de resistencia a la rodadura, respectivamente; T_r y T_f son los valores de par en los ejes de las ruedas; J_r y J_f son las constantes de inercia de las ruedas; m es la masa del vehículo.

La fuerzas de tracción se modelan como:

$$F_{xi} = F_{Ni}\mu_i \qquad i = r, f \quad (4)$$

donde μ_i es el coeficiente de fricción longitudinal del contacto entre los neumáticos y la ruta. Dicho coeficiente depende de varios factores, como el tipo de neumático, la presión de aire, las condiciones de la ruta y el deslizamiento longitudinal, el cual se define como

$$\sigma_i = \frac{\omega_i r - v_x}{\max(|\omega_i r|, |v_x|)} \quad (5)$$

El coeficiente de fricción se obtiene a partir de un modelo empírico propuesto en el cual realiza un mapeo entre el deslizamiento y el coeficiente de fricción, dado por:

$$\mu_i = \mathrm{sign}\left(\sigma_i\right)\left[A\left(1 - e^{-B|\sigma_i|}\right) + C\sigma_i^2 - D\left|\sigma_i\right|\right] \quad (6)$$

donde A, B, C y D son parámetros del modelo que dependen de las condiciones del punto de contacto entre el neumático y la ruta y son considerados constantes en este trabajo.

Las fuerzas de resistencia aerodinámicas y de resistencia a la rodadura se obtienen, respectivamente, como

$$F_{aero} = C_a \rho A_f (v_x - v_a)^2 \quad (7)$$

$$F_{rod} = mgC_r v_x \quad (8)$$

donde C_a, ρ, A_f, C_r y v_a son el coeficiente de resistencia aerodinámica, la densidad del aire, el área frontal del vehículo y la velocidad del viento con respecto a la normal, respectivamente; mientras que C_r es el coeficiente de resistencia a la rodadura.

Con el modelo descripto, es posible analizar el movimiento longitudinal del VE en función del par aplicado por el AE, considerando diferentes condiciones de manejo, tales como la pendiente de la ruta, el tipo de suelo y la velocidad del viento.

3. AE para tracción

El VE modelado es traccionado por una MI. Como sólo se estudia la dinámica longitudinal, se considera que la MI aplica el mismo par en ambas ruedas traseras. En la fig. 1 se muestra un diagrama simplificado del AE, donde: iab es un vector compuesto por las corrientes de dos fases; v* es la referencia de tensión trifásica de estator aplicada al inversor; ωm es la velocidad angular del rotor. El accionamiento posee tres estrategias de control convencionales: control orientado por el campo, control escalar a lazo cerrado (CELC, control V/f con regulación de

deslizamiento) y control escalar a lazo abierto (CELA, control V/f a lazo abierto).

En las simulaciones, se emula la reconfiguración del accionamiento mediante una llave de tres posiciones, (bloque “selección de estrategia”). El inversor utiliza llaves ideales para controlar la tensión trifásica de la máquina, a partir del valor de referencia v*.

Como se observa en la fig. 2, el AE utiliza dos sensores de corriente y un sensor de velocidad. La estrategia FOC utiliza los valores entregados por los tres sensores. Se ha recomendado esta estrategia para aplicaciones de tracción debido a sus buenas prestaciones en cuanto a desempeño dinámico, riple de par, precisión e inmunidad frente a variaciones de parámetros.

Por otra parte, la estrategia CELC utiliza solamente el sensor de velocidad y su implementación es más simple. Sin embargo, la respuesta dinámica del par o velocidad se ve degradada respecto al FOC.

Por último, la estrategia CELA es la más simple de implementar y no requiere ningún sensor, pero debe tenerse en cuenta que presenta ciertas restricciones para su utilización en AE para tracción. Al desconocerse la velocidad del rotor, se corre el riesgo de entrar en una zona de funcionamiento inestable, por lo que deberá limitarse la pendiente máxima de la velocidad de referencia utilizada en el control. Además, esta última estrategia posee el peor desempeño dinámico y la peor precisión para el control de la velocidad respecto a las anteriores estrategias.

Con la arquitectura descripta, es posible implementar un AE tolerante a fallas en los sensores mediante un algoritmo de reconfiguración

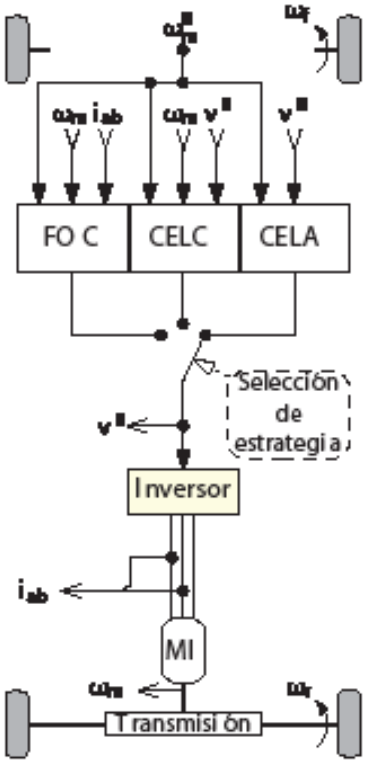


Figura 2: accionamiento eléctrico.

que actúe de la siguiente manera: se utiliza la estrategia FOC en condiciones normales, se usa CELC cuando ocurre una falla en un sensor de corriente o se cambia a CELA si se produce una falla en el sensor de velocidad.

Cuando se realiza la reconfiguración, si se cambia directamente de estrategia de control, sin considerar algún método para realizar la transición, pueden producirse discontinuidades en las fases de las tensiones aplicadas en la máquina, lo que produce grandes transitorios en el par. Por esta razón, en el presente trabajo se utiliza un método para el cambio de estrategia de control desde FOC a los controles escalares, que consiste en mantener la fase de las tensiones de referencia del inversor.

En la fig. 3 se muestra un diagrama de la implementación del método de transición, donde $\angle \underline{V}^*$ es la fase de la tensión de referencia;

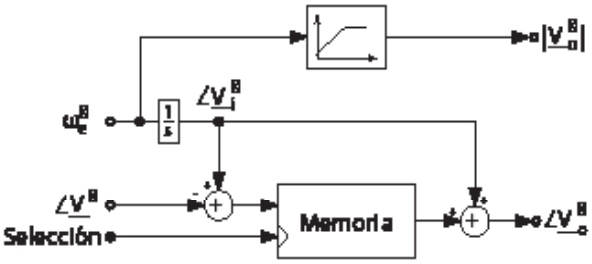


Figura 3: estrategia de transición al control escalar.

ω^*_e es la frecuencia eléctrica generada a partir de la estrategia de control escalar, ya sea CELC o CELA; $\angle \underline{V}_o^*$ y $|\underline{V}_o^*|$ son los valores de fase y magnitud a partir de los cuales se generarán los nuevos valores de referencia en el inversor; la señal "selección" se activa cuando se selecciona alguna estrategia de control escalar. De esta forma, cuando se cambia de FOC a CELC o CELA, se activa la señal "selección", memorizándose la diferencia de fases $(\angle \underline{V}_i^* - \angle \underline{V}^*)$. Como resultado, la fase inicial de la tensión de referencia de salida de la estrategia de control escalar, será la mismo que el que tenía la estrategia FOC.

El AE descripto permite analizar los efectos producidos por fallas en los sensores de corriente o en el sensor de velocidad y por cambios entre tres estrategias de control, utilizando un método de transición suave.

4. Resultados de simulación

Se realizaron diferentes simulaciones sobre el modelo de VE al aplicarle una referencia de velocidad. En las figuras 4 a 10 se muestran resultados de simulación, en los cuales el vehículo se encuentra transitando sobre una ruta con pendiente positiva de 5°. En todos los casos las fallas simuladas son abruptas, de desconexión de los sensores (el valor entregado se hace cero), siendo el tipo de falla que produce los efectos mas perjudiciales. En la tabla 1 se muestran los parámetros del modelo.

4.1 Comportamiento del vehículo ante fallas en los sensores usando solo FOC

En la fig. 4 se muestran la corriente de la fase a de la MI y la velocidad longitudinal del vehículo utilizando la estrategia FOC, mientras se aplica una velocidad de referencia para alcanzar una aceleración constante de 0.25 m/s². Esta misma velocidad de referencia se utiliza en las fig. 5 a 9. A los 0,1 s se desconecta el sensor de corriente de la fase a, sin cambiar en ningún momento de estrategia de control. En la fig. 4(a), se indica con una "X" cuando esta alcanza un valor de 5 veces la corriente nominal, lo cual ocurre aproximadamente a los 5 ms de producida la falla. Se considera que este valor es un valor crítico para el cual los distintos componentes del AE pueden sufrir algún tipo de daño. Sin embargo, el valor crítico real dependerá de las especificaciones de los elementos del AE, tales como la MI o la electrónica de potencia. Se resaltaron con una línea gruesa los valores posteriores a la situación crítica. Para valorar la magnitud del tiempo tomado como crítico, puede considerarse que si se utiliza una frecuencia de conmutación de 10 kHz en el inversor, el valor crítico es alcanzado en 50 ciclos luego de ocurrida la falla. Este tipo de análisis debe ser considerado durante el diseño del sistema de detección e identificación de fallas para una arquitectura tolerante a fallas.

En la fig. 4(b) se muestran la velocidad longitudinal del vehículo (línea continua), la velocidad de referencia (línea punteada) y la velocidad de las ruedas traseras (línea a trazos). La misma representación se utiliza en las figuras 5(b), 6(b), 7(b), 8 y 10(a). También se muestran resaltados los valores posteriores a la situación crítica señalada anteriormente. Puede observarse que la

Masa del vehículo (m)	590 kg
Inercia trasera (J_r)	2.156 kgm^2
Inercia delantera (J_f)	1.95 kgm^2
Radio de las ruedas (r)	0.268 m
Coeficiente aerodinámico (C_a)	0,5
Área frontal (A_f)	1.4 m^2
Densidad del aire (ρ)	1.225 kg/m^3
Distancia del CG al eje delantero (a)	1.02 m
Distancia del CG al eje trasero (b)	0.68 m
Pendiente (θ)	5°
Potencia nominal de la MI	7.4 kW
Frecuencia de la MI	60 Hz
Velocidad de la MI	1750 RPM
Tensión nominal de la MI	460 Vrms
Frecuencia PWM	10 kHz
A	1,12
B	$\left(\frac{K}{2}\right)^{\frac{1}{n}}$
C	0,625
D	1
K	46
d	5
n	0,6

Tabla 1: parámetros de simulación.

corriente primero alcanza el valor crítico y luego se produce una pérdida de velocidad. También se observa que las altas oscilaciones de la velocidad de la rueda producidas luego de la falla se ven amortiguadas por el neumático. Debe notarse, sin embargo, que los valores resaltados de velocidad sólo son válidos si se considera que no se ha producido ningún daño en los componentes por los altos valores de corriente.

En la fig. 5 se muestran el par producido por la máquina (fig. 5(a)) y las velocidades del vehículo (fig. 5(b)), cuando ocurre una falla en el sensor de velocidad en 0,1 s. En este caso, las corrientes no alcanzan el valor crítico utilizado anteriormente. Por esta razón, se indica con una “X” en la Fig. 5(a) cuando el par alcanza un valor de dos veces el valor nominal y negativo, a los 10 ms de ocurrida la falla. Este valor solamente afecta la dinámica del vehículo, provocando que el VE comience a frenar rápidamente. En la fig. 5(b) se observa que se produce una desaceleración mayor que en el caso anterior luego de la falla y oscilaciones menores en la velocidad de las ruedas.

En ambos casos, la pérdida de control de la MI se debe principalmente al error en la estimación de la posición del flujo del rotor, utilizada por la estrategia FOC, producido por las falla en el sensor.

4.2 Comportamiento del vehículo durante cambios de estrategia de control

En la fig. 6 se muestran la corriente de la fase a (fig. 6(a)) y la velocidad longitudinal del vehículo (fig. 6(b)), cuando se produce una falla en el sensor de corriente de la fase a a los 0,1 s y posteriormente se cambia de estrategia de control desde FOC a CELC. La reconfiguración se realiza a los 2.5 ms, la mitad del tiempo crí-

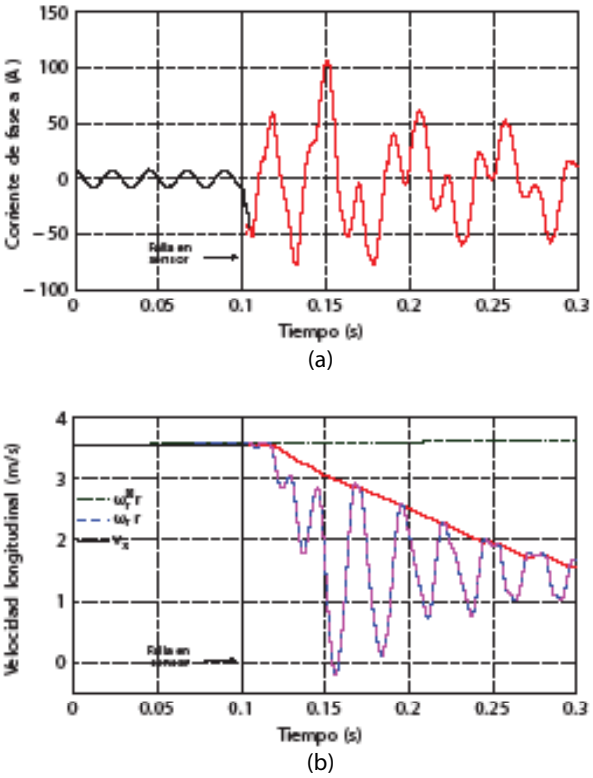


Figura 4: falla en un sensor de corriente.

tico tomado como referencia en la fig. 4. Puede observarse que la corriente no alcanza el valor de crítico y que se produce un breve transitorio en la velocidad hasta que se recupera el control del vehículo. Se concluye de esta forma que el cambio de estrategia actúa correctamente para corregir la falla, sin producir ningún efecto perjudicial en el manejo del vehículo, salvo por el peor desempeño que posee la estrategia CELC, mencionado en la sección anterior.

En la fig. 7 se muestran el par de la máquina (fig. 7(a)) y la velocidad longitudinal del vehículo (fig. 7(b)) cuando se produce una falla en el sensor de velocidad a los 0,1 s y luego se cambia de estrategia de control desde FOC a CELA. La reconfiguración se realiza a los 5 ms de ocurrida la falla, la mitad del tiempo en el que el par alcanza dos veces el valor nominal en la fig. 5. Se observa

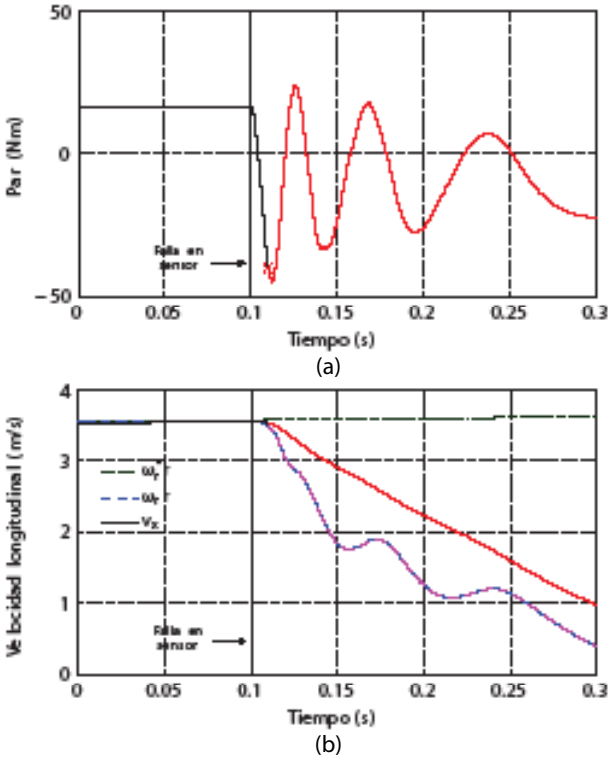


Figura 5: falla en el sensor de velocidad.

que se produce un par negativo y se reduce la velocidad del vehículo. Esto es debido al error de velocidad propio de la estrategia CELA. Se vuelve a tomar control sobre la velocidad del vehículo luego del transitorio, aproximadamente a 250 ms desde que se cambia de estrategia de control. Se puede concluir que este cambio de estrategia de control permite mantener el vehículo en funcionamiento, pero produce un breve transitorio con una desaceleración que será percibido por los pasajeros.

4.3 Cambios de estrategia de control sin transición suave

Se analizan los resultados obtenidos cuando no se utiliza el método de transición de estrategia de control propuesto en la Sección 3. La fig. 8 muestra la velocidad del vehículo cuando se realiza un cambio de estrategia de FOC a CELC, luego de una falla en un sensor de corriente, utilizando (línea continua) y sin utilizar (línea a trazos) el método de transición suave. Se puede observar una gran pérdida de velocidad en este último caso. Esta desaceleración se produce por un transitorio de par negativo sumado a la pendiente de la ruta.

A su vez, la fig. 9 muestra el par cuando se realiza un cambio de estrategia de FOC a CELA, luego de una falla en el sensor de velocidad, utilizando (línea continua) y sin utilizar (línea a trazos) el método de transición suave. Se observa que se produce un transitorio con altos valores de par en este último caso.

En ambos casos, puede notarse que una discontinuidad en la fase de la tensión aplicada a la máquina al cambiar de estrategia de control, puede producir efectos nocivos sobre la dinámica del vehículo.

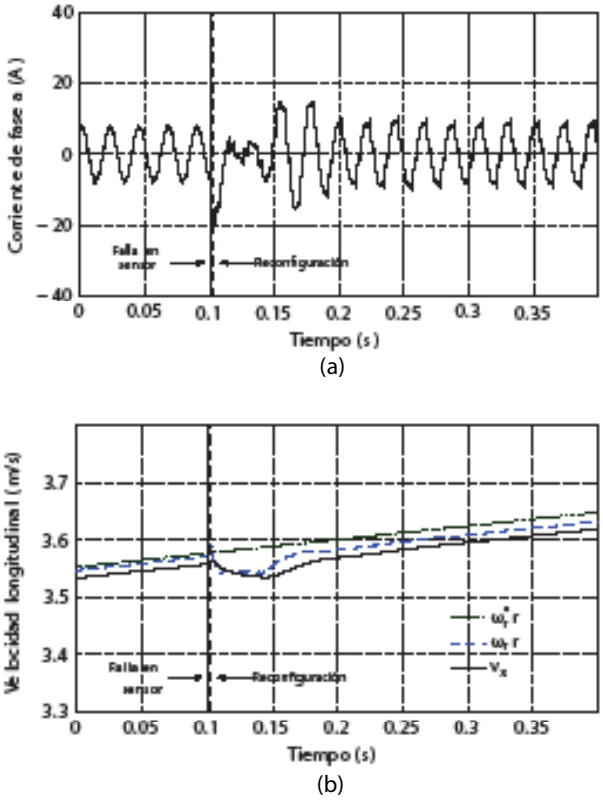


Figura 6: cambio de FOC a CELC durante falla en un sensor de corriente.

4.4 Comportamiento del vehículo usando CELA

En la fig. 10 se muestra la dinámica del vehículo durante un arranque y una parada, nuevamente sobre una pendiente de 5°, siendo controlado solamente por la estrategia CELA. En la fig. 10(a) se representa la referencia de velocidad utilizada (línea punteada) junto con la velocidad de la rueda (línea a trazos) y la velocidad del vehículo (línea continua). Asimismo, en la fig. 10(b) se muestra el desplazamiento del vehículo. Se observa que la velocidad de referencia es seguida pero con errores considerables. Además, se aprecia un importante transitorio al intentar mantener el vehículo frenado en la pendiente en los primeros 0,5 s, provocando un desplazamiento hacia atrás (4 cm). Si bien el desplazamiento producido puede considerarse de baja magnitud, debe tenerse en cuenta que hay que prevenir al conductor del vehículo sobre estos comportamientos inesperados. Por este motivo, la estrategia de control tipo V/f a lazo abierto debe evitarse y su utilización debe restringirse a casos donde sea el último recurso disponible.

5. Conclusiones

Se realizaron simulaciones sobre un modelo de vehículo eléctrico para investigar cómo es afectado por fallas en los sensores y cambios en la estrategia de control en su accionamiento eléctrico de tracción.

Puede observarse en los resultados presentados que son importantes tanto el tiempo empleado para realizar la identificación de la falla y efectuar la reconfiguración del control, como la forma en que se cambia de estrategia de con-

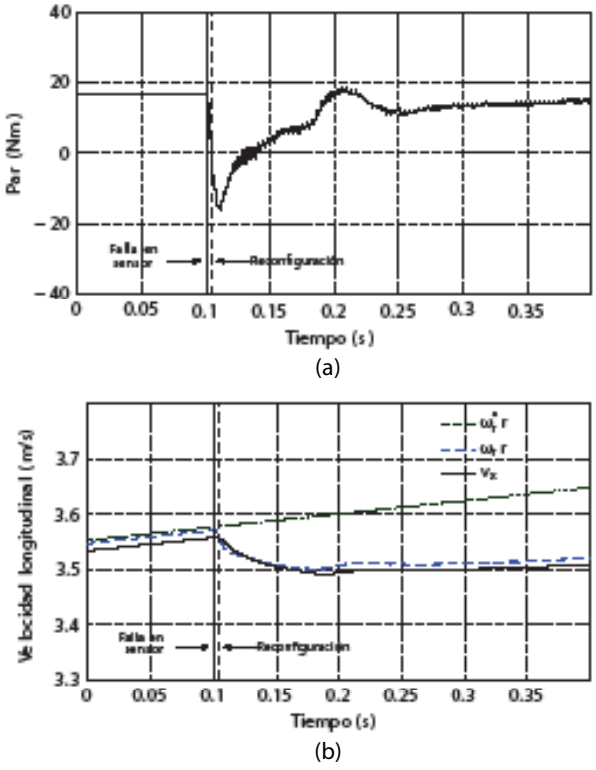


Figura 7: cambio de FOC a CELA durante falla en el sensor de velocidad.

trol. También se observa que es posible utilizar el control escalar a lazo abierto y el control escalar a lazo cerrado como estrategias simples de respaldo ante fallas en los sensores, aunque debe considerarse el pobre desempeño que tiene esta última estrategia de control. Además, se advierte que el máximo tiempo requerido por un sistema de detección e identificación de fallas va a estar determinado principalmente por los valores límites de los componentes eléctricos. Finalmente, se concluye que el modelo propuesto puede ser utilizado para evaluar y desarrollar accionamientos eléctricos tolerantes a fallas en los sensores para vehículos eléctricos.

Se propone para trabajos futuros la incorporación de mejores estrategias de control alternativas para compararlas con los métodos simples utilizados en este trabajo.

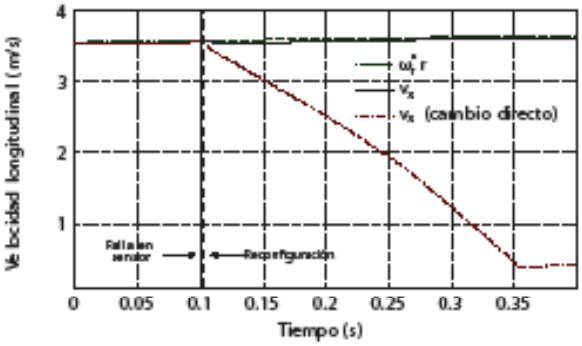


Figura 8: Paso de FOC a CELC con y sin estrategia de cambio "suave"

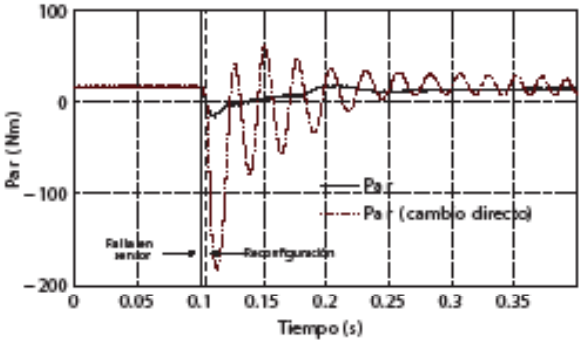
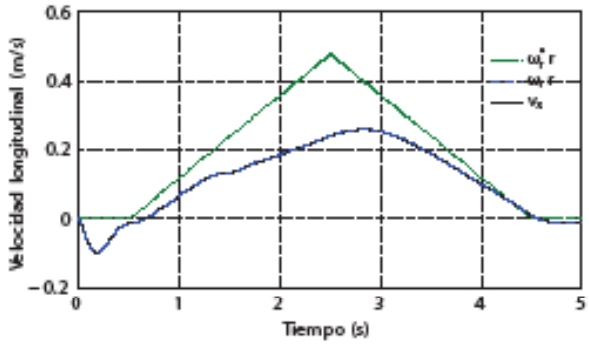
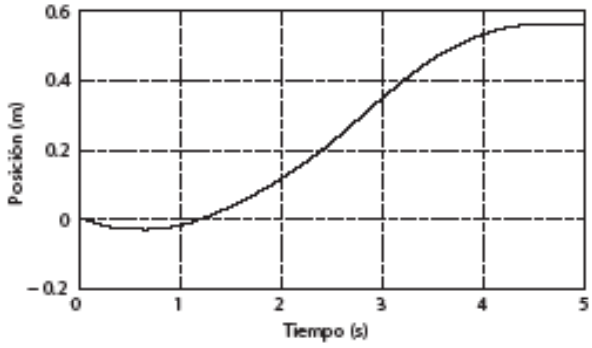


Figura 9: paso de FOC a CELA con y sin estrategia de cambio suave.



(a)



(b)

Figura 10: arranque y freno con CELA.

Referencias

Por norma editorial, no se publican las referencias bibliográficas que dan sustento a este trabajo. Por consultas de esta índole o demás cuestiones referidas al tema tratado, contactar a:

Facundo Aguilera | afacu@ieee.org
Pablo de la Barrera | pbarrera@ieee.org
Cristian De Angelo | cdeangelo@ieee.org

Nota del editor: El presente trabajo fue presentado originalmente por los autores en AADECA 2012, Semana del Control Automático.