

Capítulo 5

Estudio del efecto de la variación de la resistencia del estator sobre el DTC

5.1 Introducción

El control directo del par (DTC) utiliza la resistencia del estator de la máquina de inducción para estimar el flujo del estator, y por consiguiente el par electromagnético. La variación de la resistencia con el cambio de temperatura dificulta la operación del DTC a velocidades bajas. Si la resistencia R_S se mide (estima) durante la operación del motor, el empleo del DTC a velocidades bajas será más fiable [63],[64],[67],[128] y [131].

En el apartado siguiente se explica y muestra con la ayuda de la simulación los efectos que produce sobre el comportamiento del DTC la no utilización del valor real de la resistencia del estator.

5.2 Estudio del efecto de la variación del R_S al DTC

La resistencia del estator varía durante el funcionamiento de la máquina debido al cambio de la temperatura de la misma. A velocidades altas, la caída de tensión a través de la resistencia del estator es de pequeño valor, por lo que puede despreciarse. Sin embargo, a velocidades bajas esta caída de tensión es considerable comparada con la tensión del motor. Por tanto, la diferencia entre el valor real de la R_S del motor y el valor utilizando en el DTC provoca un error en la estimación del flujo estatórico y consecuentemente del par electromagnético y de la posición del flujo del estator [128],[131] y [137]. En realidad, el error en la posición del flujo es importante ya que obliga al controlador a seleccionar un estado de conmutación no adecuado, lo que causa el fallo del funcionamiento del controlador y por tanto afecta a la estabilidad de todo el sistema del DTC. Para estudiar este efecto, se ha simulado el sistema del DTC bajo tres casos distintos:

- a) $R_{SM} = R_{S\ DTC}$. En este caso se simula el sistema del DTC manteniendo constante la resistencia del estator del motor. Resulta que no hay diferencia entre el valor real y el valor utilizado en los cálculos, el valor actual del flujo del estator y el valor estimado son iguales. También son iguales tanto el par actual como el par calculado.

- b) $R_{SM} > R_{S\ DTC}$. Este caso representa la situación más real de la máquina. Donde la resistencia del estator aumenta gradualmente debido al incremento de la temperatura de los devanados con la carga del motor.
- c) $R_{SM} < R_{S\ DTC}$. Este caso no es tan habitual pero puede ocurrir cuando el motor funciona en ambiente frío o durante el arranque del motor.

Caso a: $R_{SM} = R_{S\ DTC}$.

Las figuras 5.2.1 hasta 5.2.5 muestran el comportamiento del DTC cuando la resistencia del estimador del flujo es igual de la resistencia del motor. Según los resultados obtenidos, los valores calculados y reales del flujo, del par y de la consigna de la corriente del estator son iguales.

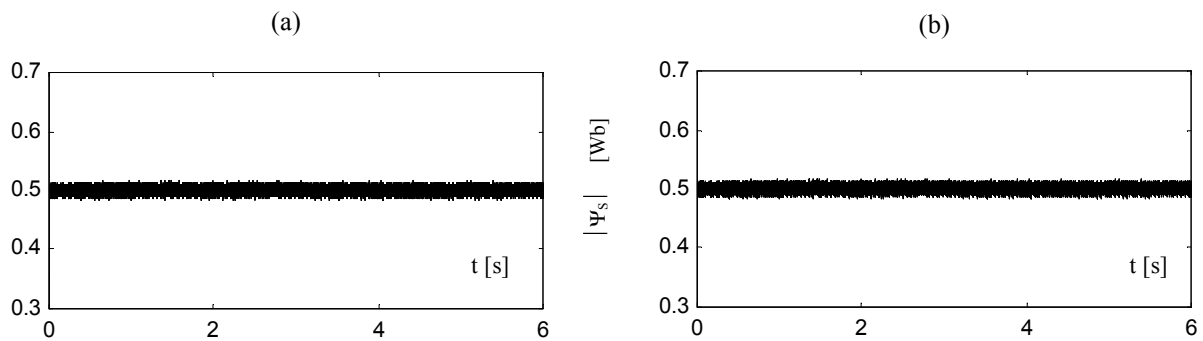


Fig. 5.2.1 Evolución temporal de la magnitud del flujo de estator:
 a) Valor real de la máquina ; b) Valor calculado con el DTC.

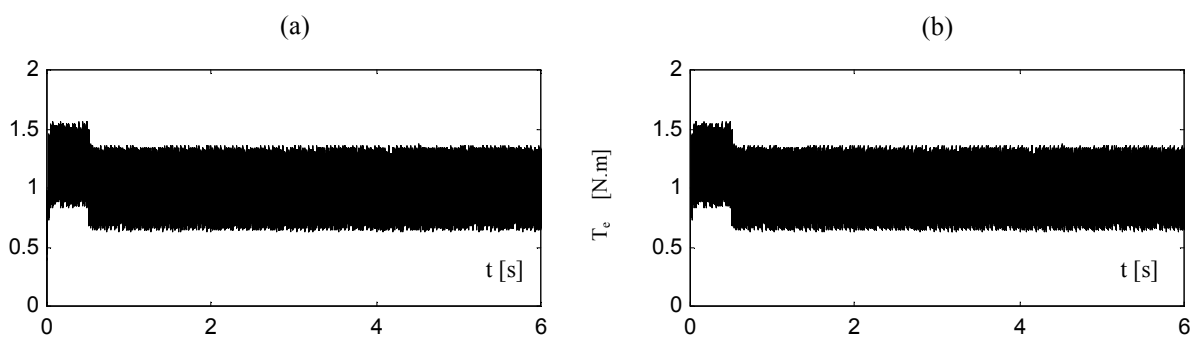


Fig. 5.2.2 Evolución temporal de la magnitud del par electromagnético:
 a) Valor real generado por la máquina.; b) Valor calculado con el DTC.

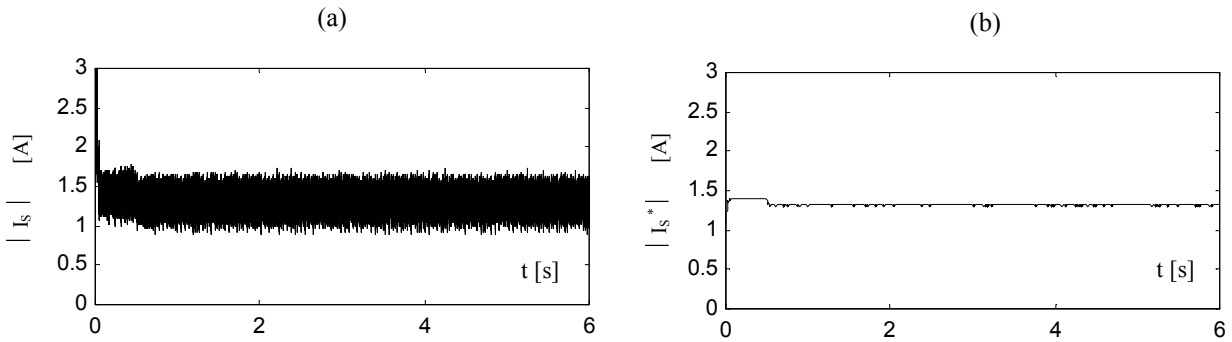


Fig. 5.2.3 Evolución temporal de la magnitud de la corriente del estator:
a) Valor real ; b) Valor deseado calculado.

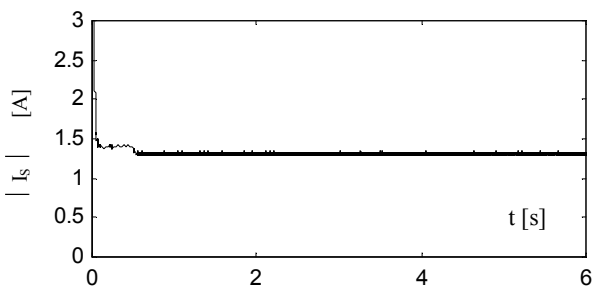


Fig. 5.2.4 Corriente real del estator filtrada.

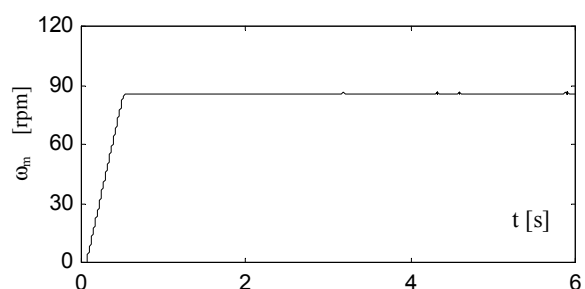


Fig. 5.2.5 Evolución temporal de la velocidad del motor.

En las figura 5.2.3 y 5.2.4, se puede observar que la consigna de la magnitud de la corriente del estator coincide con la señal de corriente actual de la máquina, y en la figura 5.2.5 se muestra la evolución temporal de la velocidad del motor.

Caso b: $R_{SM} > R_{SDTC}$.

Se ha estudiado el comportamiento del DTC cuando la resistencia actual del motor es mayor que aquella que se utiliza en los algoritmos del DTC. Se han elegido dos formas de ondas: la primera presenta el cambio brusco de la resistencia (no suele ocurrir en la práctica). La segunda forma presenta el cambio gradual de la resistencia del estator del motor sin que el DTC se entere de este cambio. Además, se ha estudiado el sistema cuando existe un lazo de control para la velocidad para generar la consigna del par electromagnético. Asimismo, se ha estudiado el sistema en lazo abierto, es decir, cuando la consigna del par viene de un generador de señal sin realimentación de la velocidad.

A tensión constante, el valor real de la corriente del estator se reduce cuando la resistencia actual aumenta, provocando un menor flujo estático y por consiguiente un menor par electromagnético. De otra parte, como los estimadores del flujo y del par utilizan el valor

nominal de la resistencia del estator, la caída de tensión será menor que la caída real, por tanto, el flujo calculado será mayor que el real. En este caso el controlador del flujo actúa rápidamente para reducir el flujo calculado y mantenerlo entre las dos fronteras determinadas por el controlador de histéresis. De esta manera el flujo calculado es mayor que el flujo actual en la máquina; y lo mismo sucede con el par calculado [71]. Los resultados de la simulación prueban lo anteriormente apuntado. La figura 5.2.6 muestra la evolución temporal de la resistencia actual del estator del motor. La simulación empieza con el valor nominal de la R_s . 1,4 segundos más tarde el valor real se aumenta a 1,6 del valor nominal. La figura 5.2.7 muestra el flujo calculado y el flujo actual, observándose que el flujo actual ha disminuido mientras el controlador sigue manteniendo el flujo calculado entre las dos fronteras.

Sin embargo, cuando existe un lazo de control para la velocidad, el par deseado generado será mayor para compensar la caída de velocidad. En este caso el controlador del DTC regula el par según la consigna generada por el controlador de la velocidad. Por tanto, existe una diferencia entre el par calculado del DTC y el par actual de la máquina.

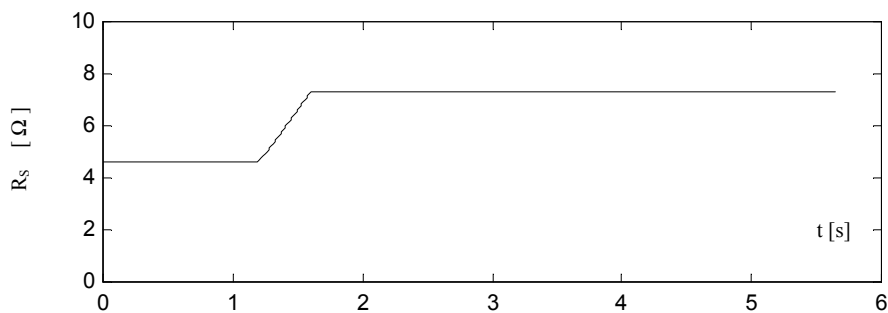


Fig. 5.2.6 Evolución temporal de la resistencia del estator.

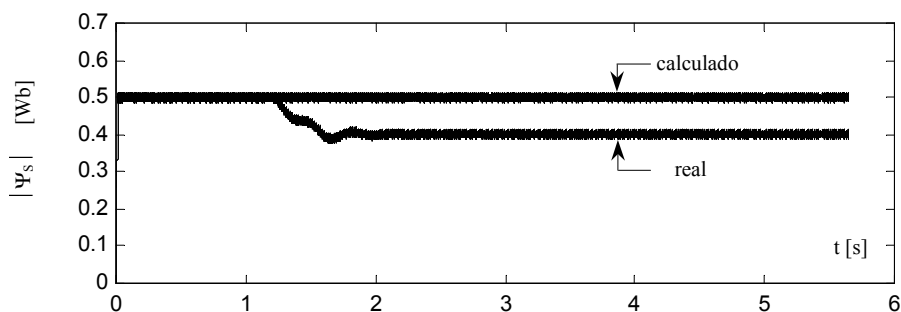


Fig. 5.2.7 Evolución temporal de la magnitud del flujo estatórico.

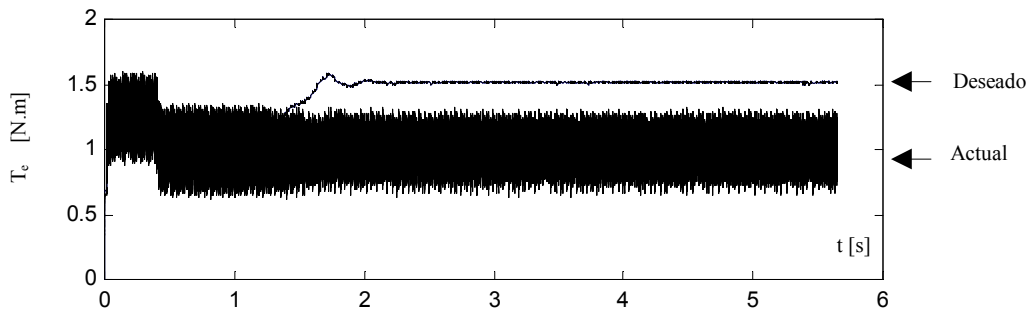


Fig. 5.2.8 Evolución temporal de la magnitud del par electromagnético.

La figura 5.2.8 muestra tanto el par deseado como el par actual. La diferencia es debida a la caída de velocidad que aumenta el par deseado. Sin embargo, el par actual no alcanza el valor de la consigna por el cambio de la resistencia y por consiguiente de la corriente de estator.

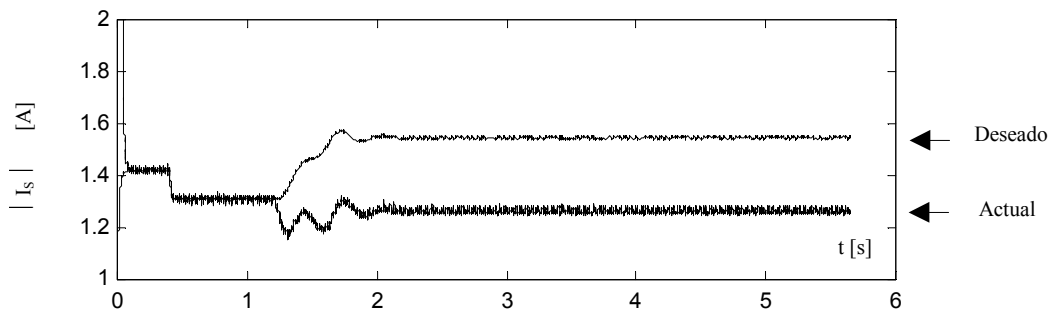


Fig. 5.2.9 Evolución temporal de la magnitud de la corriente de estator.

En la figura 5.2.9 se muestra el valor actual de la magnitud de la corriente del estator y el valor deseado corresponde a las consignas del par y del flujo. Se nota que el valor real de la corriente del estator cuando la resistencia ha aumentado es menor que el valor antes de dicho cambio. Con la ayuda de esta señal se puede explicar el porqué de la reducción del flujo actual del motor. De otra parte, la magnitud de la corriente deseada ha aumentado debido al incremento de la consigna del par como se explicó anteriormente.

El objetivo de las simulaciones siguientes es estudiar el sistema del DTC bajo otra forma de cambiar la resistencia del estator, acercándose a un caso casi real de aplicación industrial. Se ha variado la resistencia de forma lineal durante casi 5 segundos y después se ha fijado a 160% de su valor inicial durante el tiempo de simulación restante, tal como se muestra en la figura 5.2.10, y manteniendo el lazo cerrado de la velocidad.

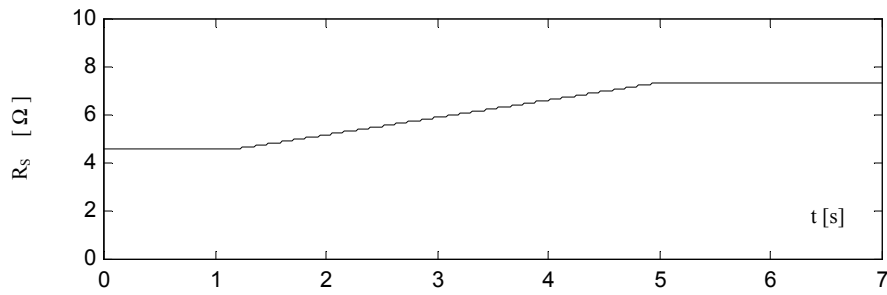


Fig. 5.2.10 Evolución temporal de la resistencia del estator.

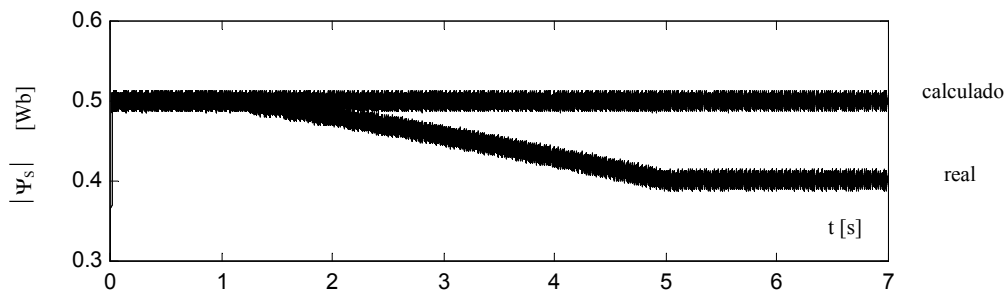


Fig. 5.2.11 Evolución temporal de la magnitud del flujo estatórico.

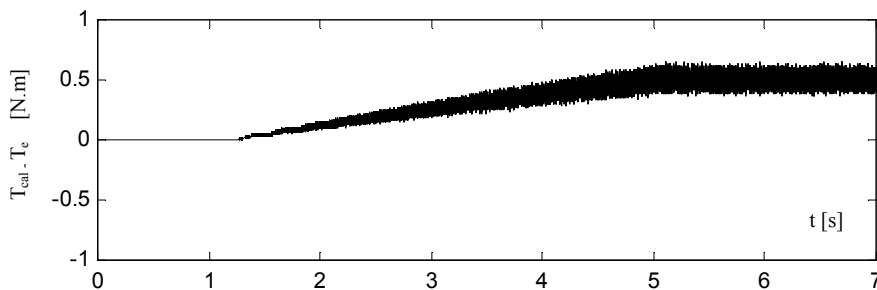


Fig. 5.2.12 Evolución temporal del error entre el par calculado y el par real.

La figura 5.2.11 muestra la magnitud del flujo real del estator y la magnitud del flujo calculado por el DTC. Se puede observar que la diferencia entre ambas señales tiene el mismo aspecto que el cambio de la resistencia. De otra parte, la figura 5.2.12 registra la diferencia entre el par actual de la máquina y el par calculado por el DTC. En ella se puede observar una similitud con la variación de la resistencia. El par deseado y el par actual se pueden observar en la figura 5.2.13. El valor deseado de la corriente del estator se calcula según la consigna del par y del flujo tal como se muestra en la figura 5.2.14. En la misma figura se presenta la magnitud de la corriente real del estator.

La diferencia entre las dos señales es debido al cambio de la resistencia entre el valor real dentro la máquina de inducción y el valor fijo utilizado por los algoritmos del DTC.

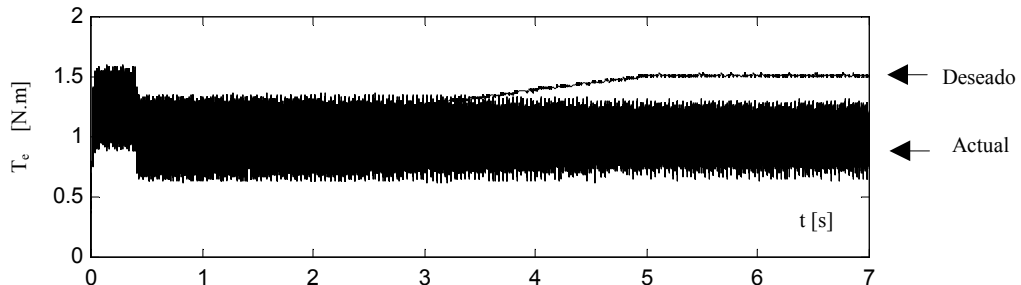


Fig. 5.2.13 Evolución temporal de la magnitud del par electromagnético.

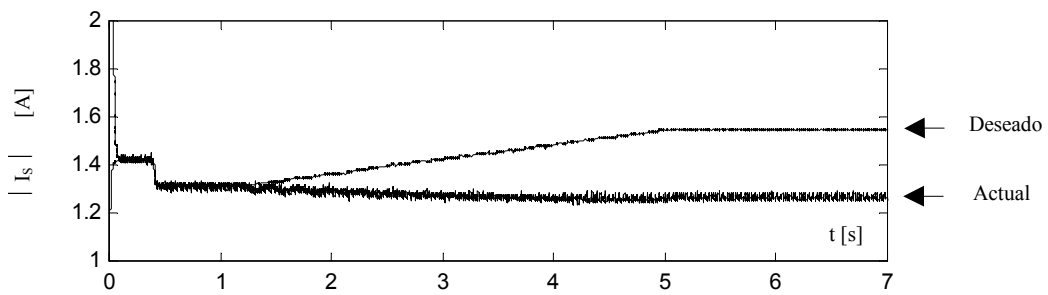


Fig. 5.2.14 Evolución temporal de la magnitud de la corriente de estator.

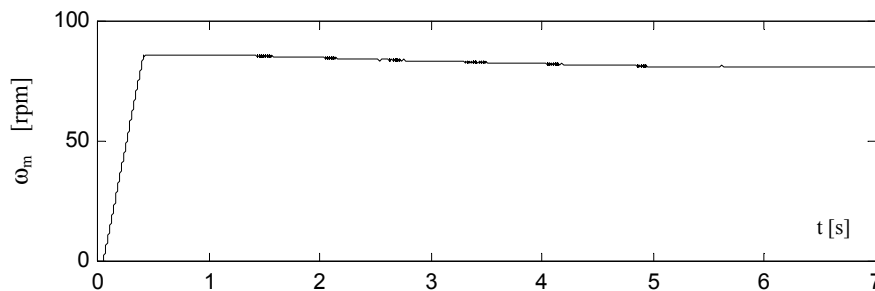


Fig. 5.2.15 Evolución temporal de la velocidad del motor.

La figura 5.2.15 muestra la velocidad del motor. Antes de estudiar otro caso, se puede comentar que cuando existe un lazo cerrado para la velocidad, cualquier aumento de la resistencia del estator que no sea detectada, el DTC reduce tanto la corriente actual del estator como el flujo estatórico actual. Sin embargo, el par se compensa automáticamente debido a la realimentación de la velocidad del motor que modifica la consigna del par.

El caso siguiente presenta el comportamiento del DTC cuando no existe un lazo cerrado para la velocidad y la resistencia del estator aumenta gradualmente con el tiempo, sin embargo el estimador del flujo y del par no se entera de este cambio. Se puede observar que la ausencia del lazo cerrado de la velocidad empeora el comportamiento del DTC, debido a la consigna del par no se adapta a la variación de la velocidad debida a la variación de la resistencia, lo que se traduce en la variación del par actual. En este caso es necesario detectar el valor real de la resistencia del estator. Las figuras siguientes corresponden a este caso de funcionamiento.

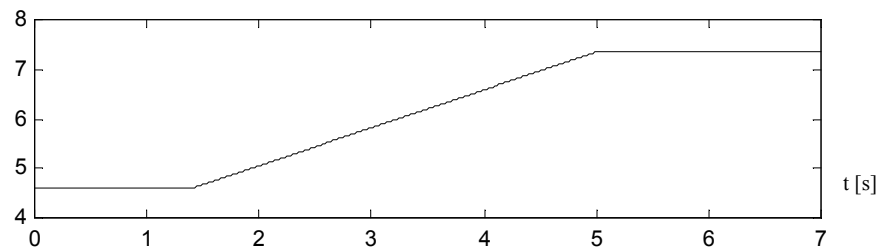


Fig. 5.2.16 Evolución temporal de la resistencia del estator.

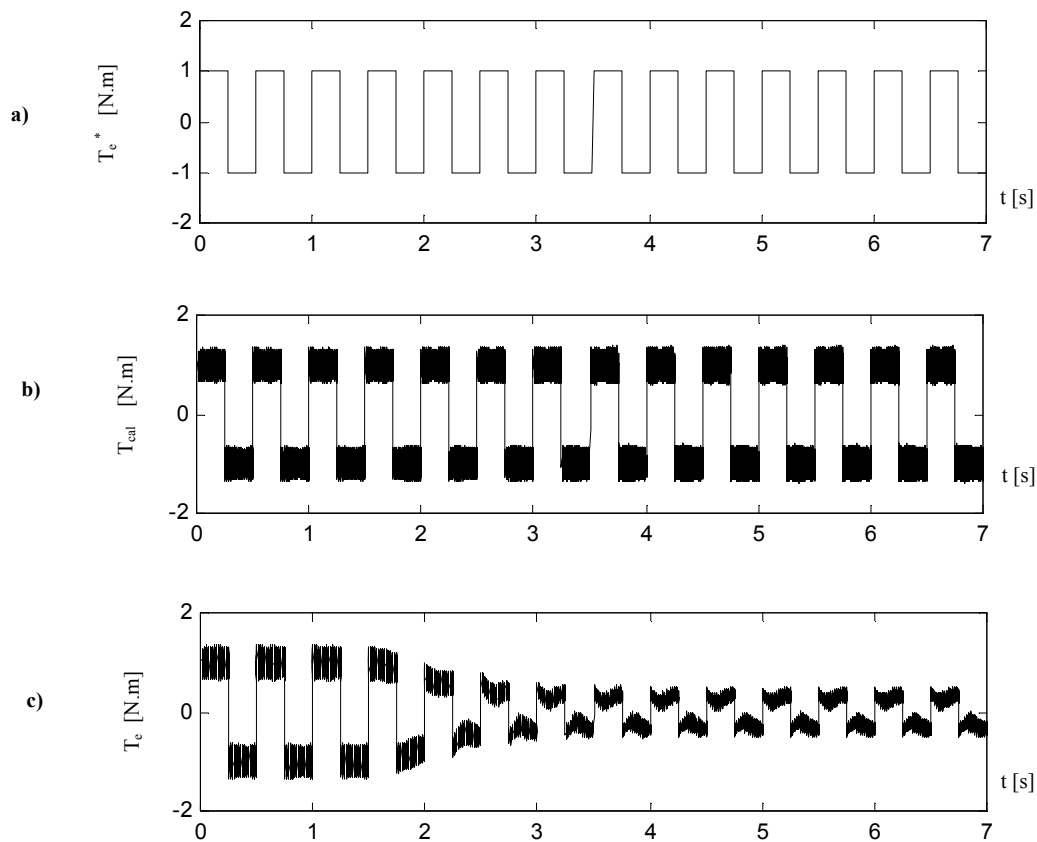


Fig. 5.2.17. Evolución temporal del par electromagnético:
a) La consigna; b) El par calculado; c) El par actual.

La figura 5.2.16 muestra como varía la resistencia del estator a partir del valor nominal, evolucionando después de 1,4 segundo hasta 160 % del valor nominal en 3,6 segundo. Las figuras 5.2.17.a, 5.2.17.b, y 5.2.17.c muestran la consigna del par electromagnético, el par calculado y el par actual respectivamente. Se puede observar que el par real disminuye cuando la R_S real aumenta. Sin embargo, el par calculado no se ve afectado por el cambio ocurrido en la resistencia real del motor porque los algoritmos que calculan tanto el flujo como el par utilizan el valor nominal de la resistencia.

Estas señales se han ampliados en las figuras 5.2.18 y 5.2.19. Las figura 5.2.18 y 5.2.19 muestran tanto la consigna del par, el par electromagnético real, y el par calculado por el DTC. La figura 5.2.20 muestra la magnitud del flujo calculado y el flujo real.

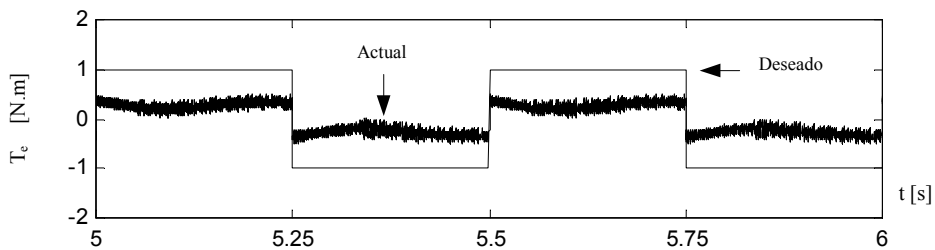


Fig. 5.2.18 Evolución temporal del par electromagnético.

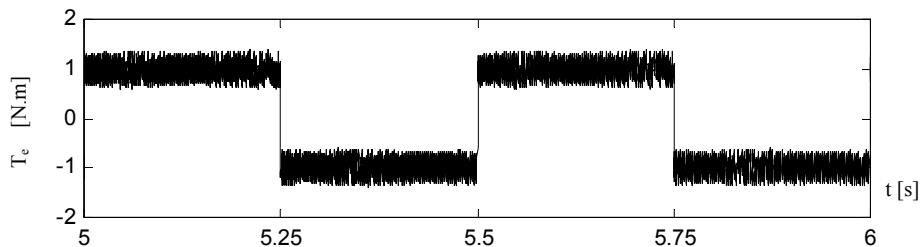


Fig. 5.2.19 Evolución temporal del par calculado.

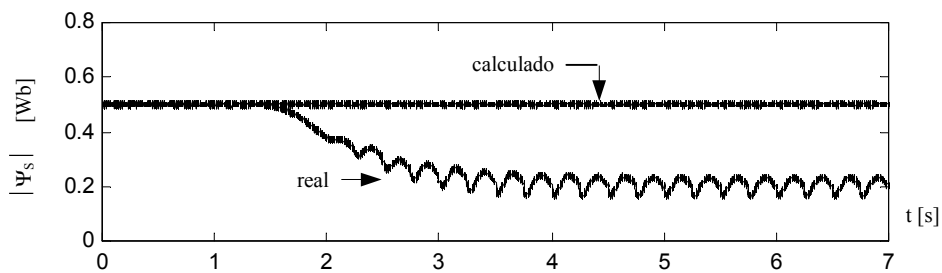


Fig. 5.2.20 Evolución temporal de la magnitud del flujo estático.

Según la figura 5.2.20, el flujo real tiene un valor menor que el flujo calculado y por supuesto menor que él de la consigna del flujo de estator. Además, con la subida de la resistencia del estator, la magnitud de la corriente real del estator ha sido menor que el valor que le corresponde con la resistencia nominal. Ahora vamos a ver como actúa el controlador del DTC. Este comportamiento puede explicarse como sigue:

- . La resistencia real ha aumentado, y la corriente real ha sido menor de la necesaria.
- . La resistencia utilizando en el DTC es fija y tiene el valor nominal.
- . La caída de tensión se reduce, y por tanto, el flujo calculado será mayor que él de consigna.
- . El controlador del flujo actúa rápidamente para que el flujo baje otra vez y para que sea controlado entre los dos límites. Para conseguir esto, se aplican vectores de tensión propuestos que hagan la tensión en bornes de la máquina, lo que finalmente reducirá el flujo.
- . Como consecuencia del apartado anterior, se reducirá de nuevo la corriente del estator.
- . Si el cambio de resistencia no es realmente grande y la carga no es demasiado elevada, el sistema puede soportarlo, pero funcionando con menor flujo y menor par. Sin embargo, la estabilidad del sistema se ve afectada si la carga es mayor que el par generado por el motor. Y dado que no existe un lazo cerrado para la velocidad, el par electromagnético no se compensará empeorando el comportamiento del DTC.

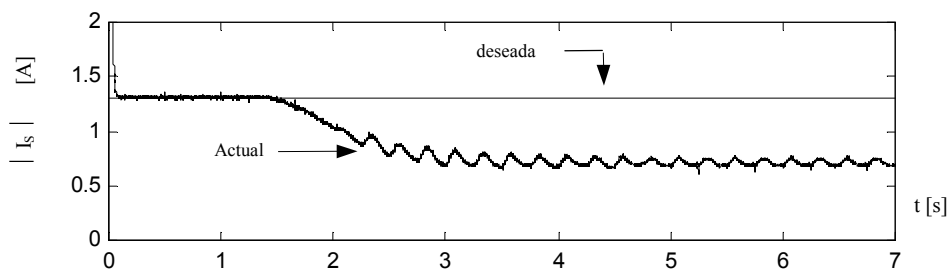


Fig.5.2.21 Evolución temporal de la magnitud de la corriente de estator.

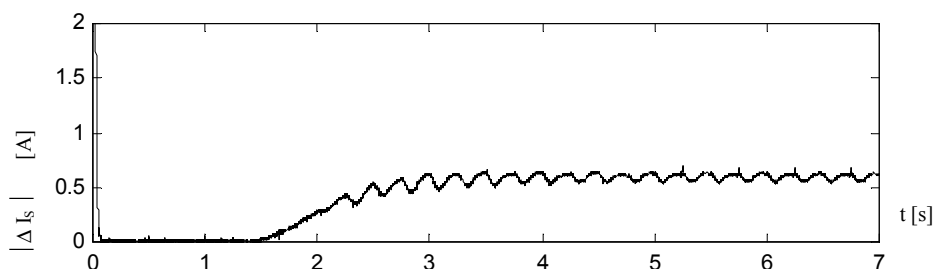


Fig. 5.2.22. Evolución temporal del error de corriente.

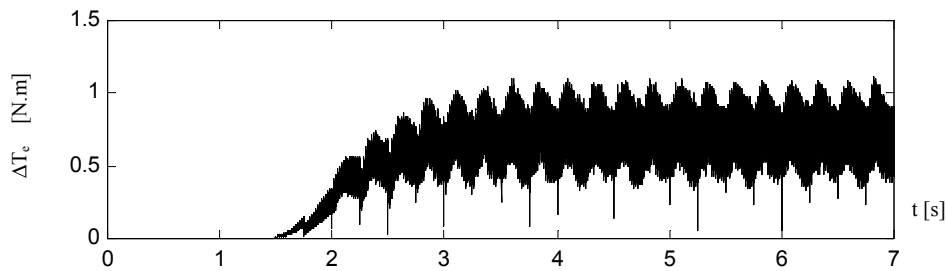


Fig. 5.2.23. Evolución temporal del error del par entre el par calculado y el par actual.

La figura 5.2.22 presenta la diferencia entre la corriente deseada y la corriente real del estator del motor. De la misma manera, la figura 5.2.23 muestra el error del par entre el par calculado y el par electromagnético real.

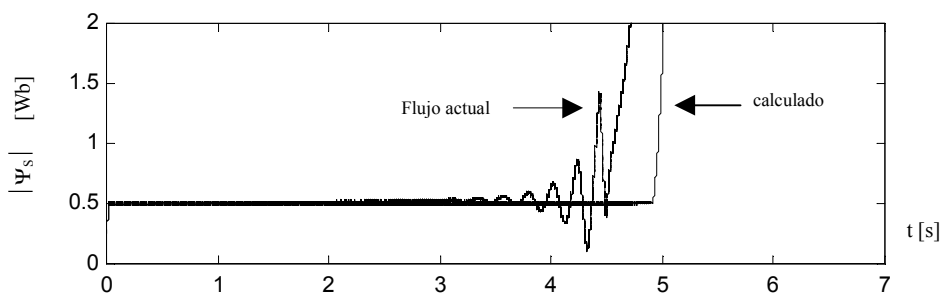
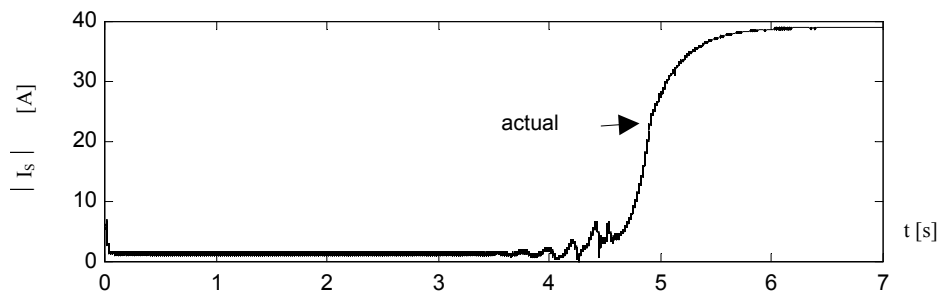
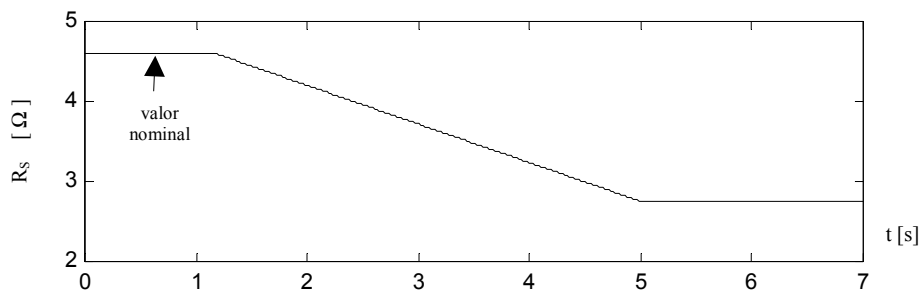
Caso c: $R_{SM} < R_{SDTC}$.

La posibilidad que ocurra este caso en la práctica es muy baja, pero existe esta probabilidad cuando el motor está instalado en un ambiente muy frío. En tal caso la resistencia real del estator puede ser menor que el valor nominal utilizado en los algoritmos del DTC. Cuando este caso de funcionamiento ocurre, la corriente del estator aumenta provocando más flujo y más par electromagnético. Al mismo tiempo el controlador tiene efecto contrario como se explica en los puntos siguientes:

- La resistencia actual es menor que la nominal.
- La corriente del estator es mayor que en el caso anterior.
- El controlador utiliza el valor nominal, y por tanto el flujo calculado es menor que el real por lo que la caída de tensión es superior a la real. Por consiguiente, el controlador del flujo actúa para aumentar el flujo eligiendo un estado de conmutación activo que aumente la tensión en bornes, lo que se traducirá en los consiguientes aumentos de la corriente y del flujo.
- Se origina una realimentación positiva hasta que las corrientes del estator alcanzan unos valores tan elevados que hacen saltar las protecciones. El sistema solo será inestable dentro algunos segundos de funcionamiento.

Las simulaciones siguientes muestran el comportamiento del DTC bajo esta condición de funcionamiento, observándose que el sistema no es estable.

La figura 5.2.24 muestra la evolución del valor de la resistencia actual del estator durante la simulación, partiendo del valor nominal se reduce hasta 60 % del valor nominal en 3,6 segundos. La figura 5.2.25 muestra la magnitud de la corriente del estator, observándose que la realimentación positiva hace que la corriente crezca hasta valores muy elevados. La figura 5.2.26 muestra el flujo actual y el flujo calculado. Se observa que el flujo actual aumenta cuando la resistencia baja provocando la inestabilidad de todo el sistema. Las evoluciones del par calculado y el par actual se muestran en las figuras 5.2.27 y 5.2.28. Se puede observar que la reducción de la resistencia real del motor provoca la inestabilidad del sistema del DTC.



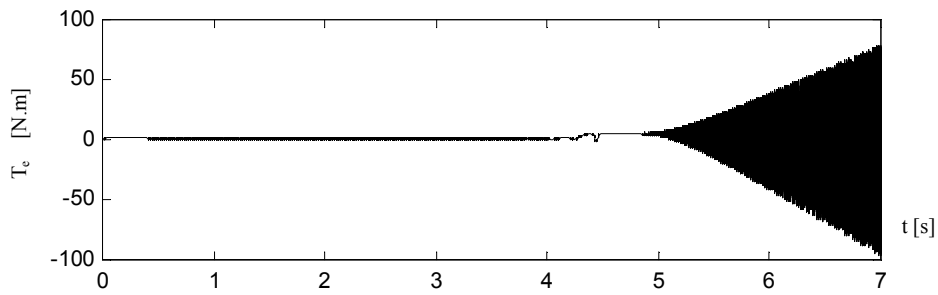


Fig. 5.2.27. Evolución temporal de la magnitud del par calculado.

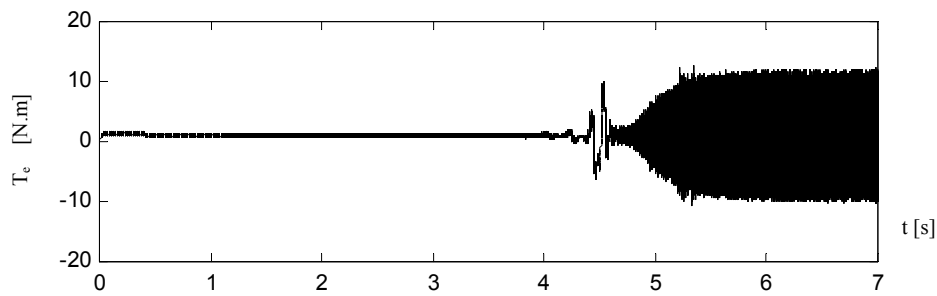


Fig. 5.2.28 Evolución temporal de la magnitud del par real.

La inestabilidad del sistema se refiere a los errores tanto en el cálculo del ángulo del flujo estático como en el sector calculado que se utiliza para elegir los estados de conmutación adecuado. Por consiguiente, cualquier error en el sector produce un estado de conmutación que no es adecuado para cumplir con los requisitos de la magnitud del flujo y de la magnitud del par, lo que finalmente afecta la estabilidad del sistema del DTC. Las figuras 5.2.29 y 5.2.30 muestran la diferencia entre el valor del sector cuando hay reducción de la resistencia del estator y el caso normal en el que no existe ninguna diferencia entre el valor actual de R_S y el valor utilizado en el DTC.

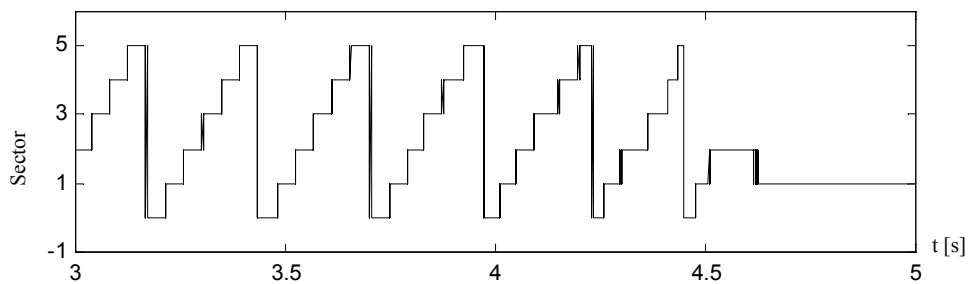


Fig. 5.2.29 Evolución temporal del valor del sector cuando $R_{S\text{DTC}} < R_{S\text{ nominal}}$.

De la misma manera, las figuras 5.2.31 y 5.2.32 muestran el ángulo de flujo del estator en ambos casos. Es importante indicar que el cambio de la resistencia del estator no tiene un efecto tan grave si la velocidad del motor es alta. Por este motivo, el comportamiento del DTC

no se ve afectado en el rango de las medias y altas velocidades. Las simulaciones siguientes muestran este hecho cuando la velocidad del motor es 750 rpm.

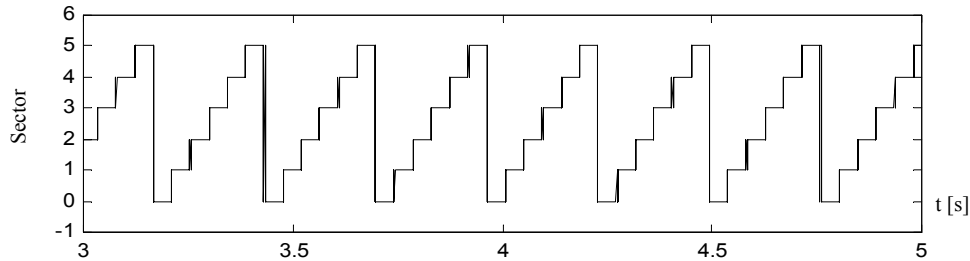


Fig. 5.2.30 Evolución temporal del valor del sector cuando $R_{S\ DTC} = R_{S\ nominal}$.

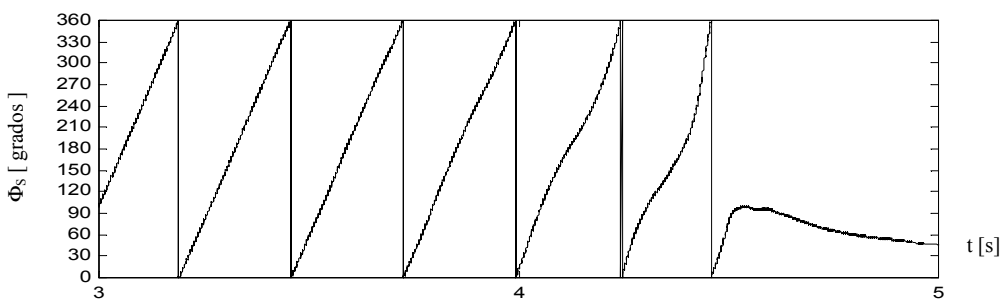


Fig. 5.2.31 Evolución temporal del valor calculado del ángulo del flujo cuando $R_{S\ DTC} < R_{S\ nominal}$.

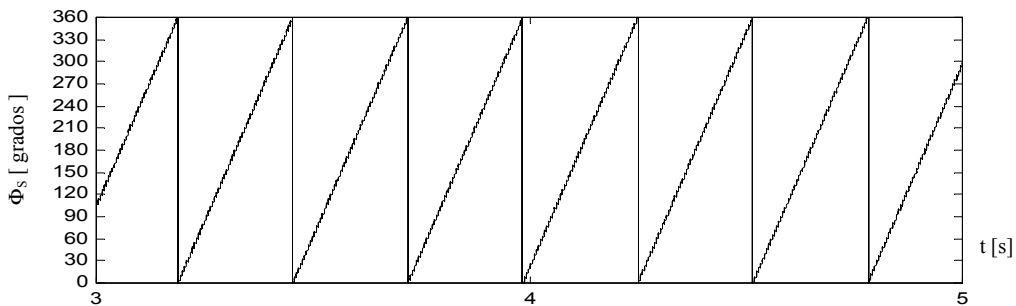


Fig. 5.2.32 Evolución temporal del valor calculado del ángulo de flujo cuando $R_{S\ DTC} = R_{S\ nominal}$.

La figura 5.2.33 muestra la magnitud real del flujo del estator cuando la resistencia del estator se cambia al 160 % del valor nominal. Se puede ver de los resultados que no se presentan grandes diferencias en la magnitud del flujo del estator antes de variar la resistencia y después la variación. Para evaluar la diferencia entre el flujo calculado y el flujo actual, en la figura 5.2.34 se presenta el error del flujo del estator. El error máximo entre las dos señales no supera 0.012 Wb, que representa 2.4 % del valor de la consigna del flujo, con una variación de la resistencia del 160 % del valor nominal. Además, el error entre la magnitud del par

electromagnético actual y el par calculado, en la figura 5.2.35, está entre .04 N.m y 0.1 N.m, es decir entre 4 % y el 10 % del valor de la consigna del par.

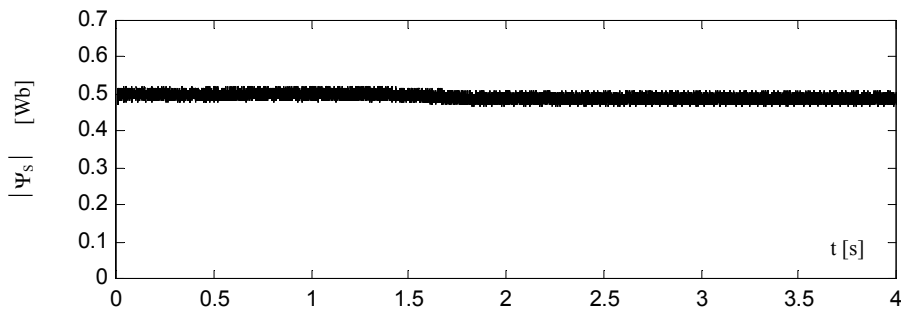


Fig. 5.2.33. Evolución temporal de la magnitud real del flujo del estator.
($R_{SM} = 1.6 R_{Snominal}$, $R_{SDTC} = R_{Snominal}$).

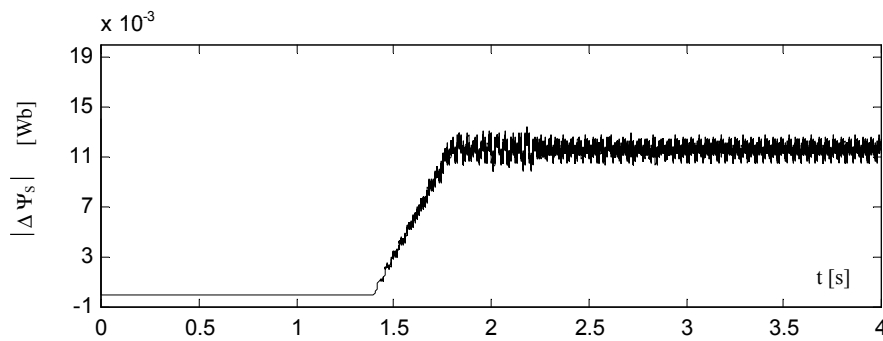


Fig. 5.2.34. Evolución temporal del error del flujo de estator.

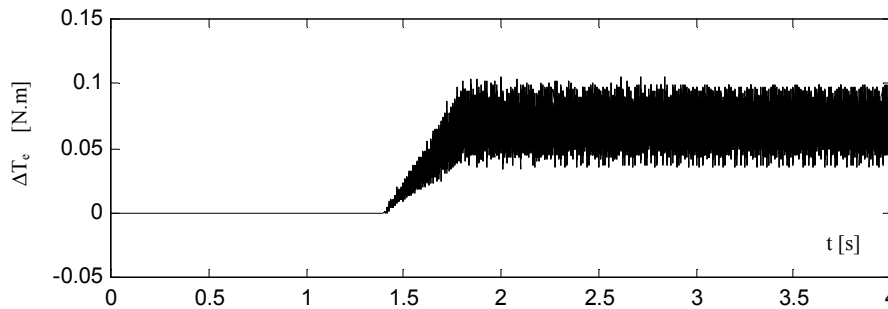


Fig. 5.2.35. Evolución temporal del error del par electromagnético.

5.3 Estimación del valor real del R_s

En el apartado anterior se ha mostrado el comportamiento del DTC cuando se varía la resistencia del estator del motor sin que lo detecte el estimador del flujo del DTC. Para evitar la inestabilidad provocada por el cambio de la resistencia es esencial estimar el valor real de la resistencia, tanto durante el arranque como durante el funcionamiento del motor.

5.3.1 Determinación de la resistencia del estator durante el arranque

El método utilizado para calcular la resistencia del estator cuando se arranca el motor se basa en que FEM del motor en el instante inicial del proceso de arranque es nulo (rotor parado), por tanto, si en dicho estado se aplica una tensión a las fases del motor, a partir de la medida de la corriente de una fase se puede calcular la resistencia de la misma [139]. Durante este proceso, se puede aplicar un vector activo durante un porcentaje del ciclo del PWM, y aplicar un vector cero durante el resto del ciclo, para evitar un gran aumento de la corriente inicial del estator durante este proceso. La figura 5.3.1.1 muestra el circuito de potencia de un inversor alimentando una carga trifásica.

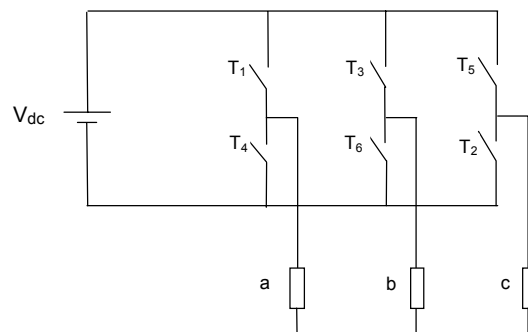


Fig. 5.3.1.1 Circuito de potencia del accionamiento alimentado por un inversor B6.

Cuando se aplica un estado de conmutación activo, sea por ejemplo el S_1 (100), el vector equivalente es el V_1 . Y los interruptores T_1 T_2 T_6 están conectados, tal como circuito se muestra en la figura 5.3.1.2. Además, cuando se aplica durante el resto del periodo de PWM un estado cero, por ejemplo el S_0 (000), el vector equivalente es el V_0 . Tal como se representa en la figura 5.3.1.3. a partir de los valores medios de la tensión durante el periodo completo y la medida de la corriente de la fase (a) se puede calcular el valor de la resistencia del estator.

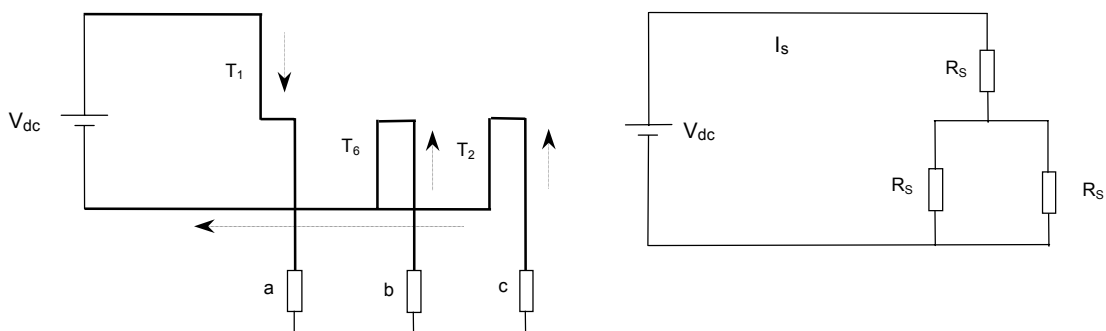


Fig. 5.3.1.2 Circuito equivalente cuando se aplica el vector V_1 .

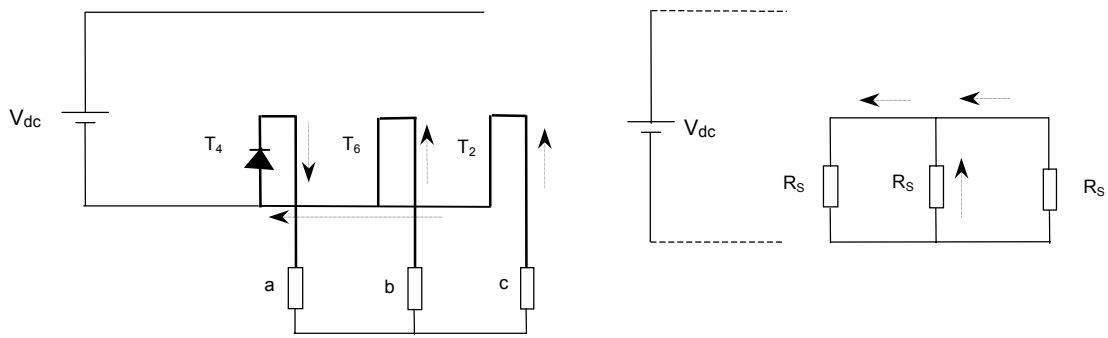


Fig. 5.3.1.3 Circuito equivalente cuando se aplica el vector V_0 .

Para calcular la resistencia de cualquier fase del estator, antes de utilizar el DTC se aplica el vector V_1 y V_0 alternativamente. Durante el tiempo que se aplica el vector activo la corriente aumenta, mientras que cuando se aplica el vector cero la corriente disminuye. Para controlar la magnitud de la corriente, para que no exceda de un límite seguro, se elige un ciclo de funcionamiento adecuado [139]. El valor de la resistencia se obtiene dividiendo el valor medio de la tensión de alimentación por la corriente medida. A veces, puede resultar positivo utilizar filtros para obtener el valor de la resistencia. Para reducir la ondulación se elige una frecuencia de conmutación bastante alta tal como se muestra en las figuras 5.3.1.4 y 5.3.1.5. La figura 5.3.1.4.a muestra la tensión conmutada que alimenta el motor V_{ab} , con un funcionamiento (D) del 50 %. Mientras que la figura 5.3.1.5.a muestra la tensión conmutada para un funcionamiento (D) del 10 %. Las figuras 5.3.1.4.b y 5.3.1.5.b muestran las corrientes respectivas I_a en ambos casos.

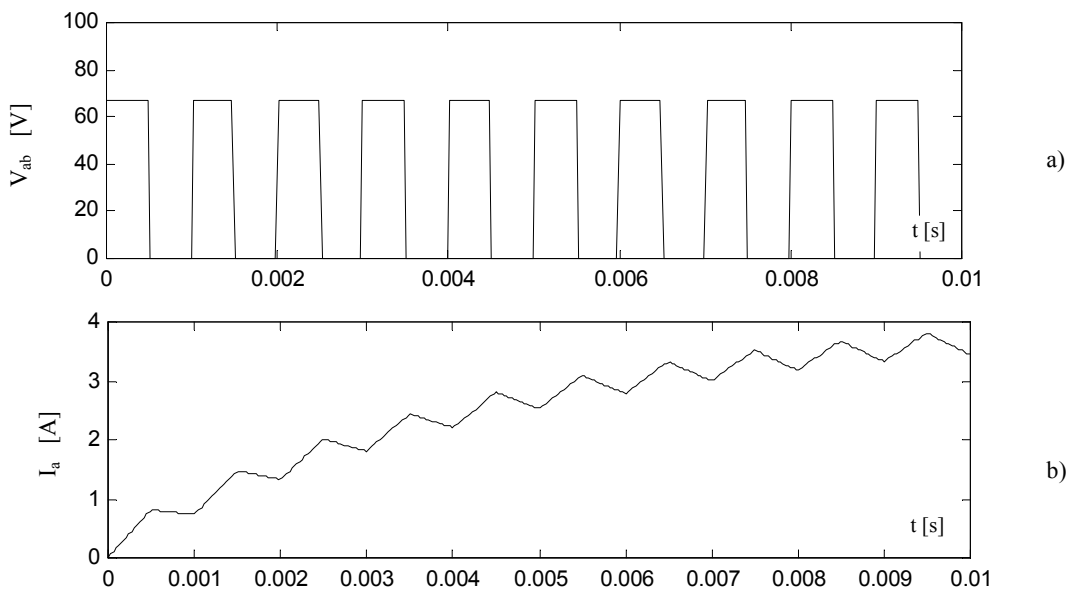


Fig. 5.3.1.4 Evolución temporal de la tensión y de la corriente para $D = 50\%$
 a) Tensión V_{ab} . b) Corriente i_a .

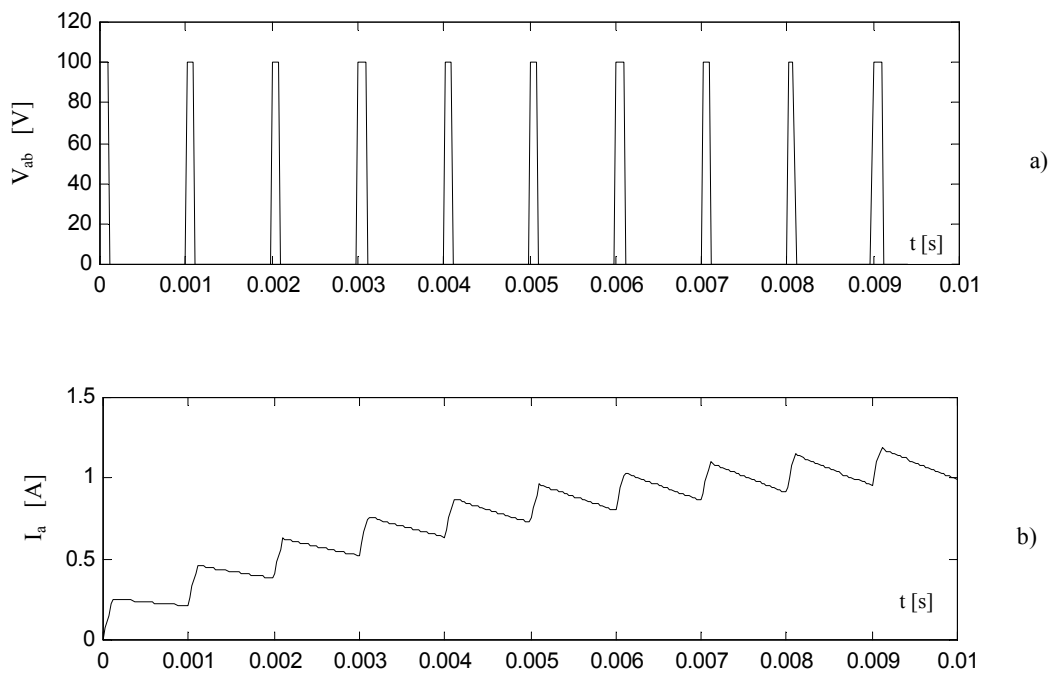


Fig. 5.3.1.5 Evolución temporal de la tensión aplicada y de la corriente para $D = 10\%$
 a) Tensión V_{ab} . b) Corriente i_a .

El valor medio de la tensión de alimentación del motor según las figuras 5.3.1.2 y 5.3.1.3 es:

$$V_{med} = D V_{dc} \tag{5.3.1}$$

Donde D puede variar entre 0 hasta 1.

El valor medio de la corriente estática es:

$$I_S = V_{med} / R_t \tag{5.3.2}$$

La resistencia equivalente total es:

$$R_t = \frac{3}{2} R_s \tag{5.3.3}$$

Por tanto, la resistencia estática vale:

$$R_s = \frac{2}{3} D \frac{V_{dc}}{I_S} \tag{5.3.4}$$

En realidad cuando se aplica el vector V_1 , el vector espacial equivalente solo tendrá componente en la dirección d , y por consiguiente toda la corriente tendrá también la dirección d ($i_q=0$). Mediante el cálculo de V_d e I_d se puede calcular la resistencia del estator de cualquiera fase [64]. También se puede añadir un filtro para obtener el valor de la resistencia del estator. La ecuación siguiente es la otra forma para calcular la resistencia de la fase por el conocimiento de la tensión en el eje d y la corriente en el eje d [64].

$$R_{S(calculada)} = DV_d / I_d \tag{5.3.5}$$

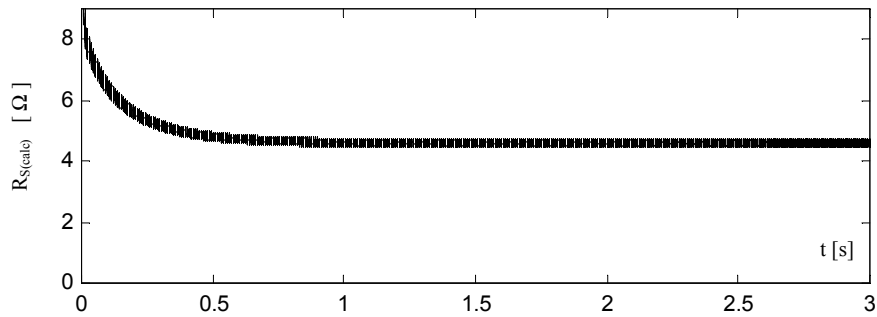


Fig. 5.3.1.6 Resistencia del estator calculada por la ecuación 5.3.4.

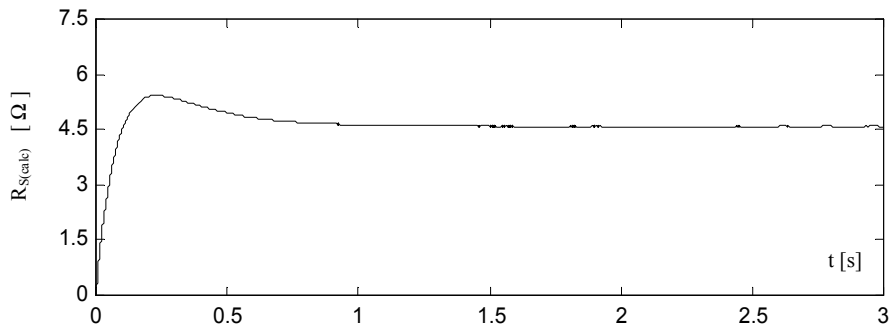


Fig. 5.3.1.7 Resistencia calculada por la ecuación 5.3.4 después de filtrarla.

El valor calculado de la resistencia del estator coincide con el valor real (4.6Ω) 1,5 segundos después del inicio del arranque de la máquina, tal como muestran las figuras 5.3.1.6 y 5.3.1.7. La figura 5.3.1.8 muestra la evolución temporal del valor calculado de la resistencia del estator utilizando la ecuación 5.3.5.

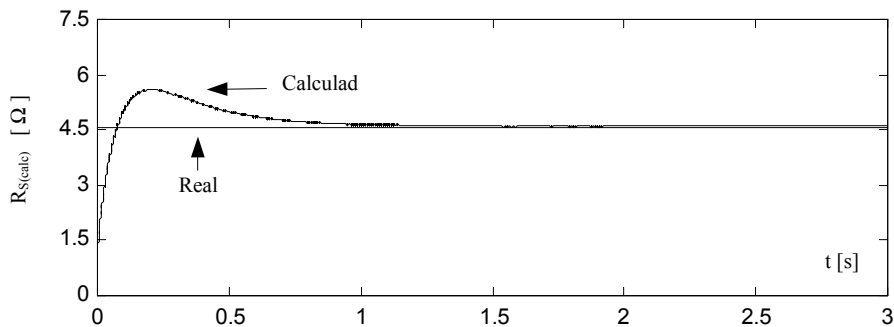


Fig. 5.3.1.8 Resistencia calculada por la ecuación 5.3.5 después de filtrarla.

5.3.2 Estimación de la resistencia real del estator en régimen permanente

En este apartado se presenta un estimador borroso para calcular la resistencia del estator. Mediante él, se detecta el error entre la magnitud del vector de la corriente real del estator y la magnitud del vector de la corriente deseada del estator que se calcula del flujo estatórico y la consigna del par electromagnético para estimar la variación de la resistencia. Es decir, a partir de la consigna del par y la consigna del flujo se calcula la magnitud de la corriente del estator que corresponde a estos valores. Si el valor de la resistencia del estator utilizado en los algoritmos del DTC es el mismo que el de la resistencia real de la máquina, las magnitudes de las corrientes del estator medida y calculada coinciden [63],[67] y [71]. No obstante, cualquier diferencia entre el valor real de la resistencia actual de la máquina y el valor utilizado en el algoritmo del DTC se refleja a la consigna de la corriente del estator y también en la corriente real. Este se puede entender con la ayuda de las figura 5.2.6 hasta 5.2.9. Por tanto, se aprovecha la diferencia entre estos dos valores para detectar el cambio en la resistencia del estator [67].

La figura 5.3.2.1 muestra el diagrama de bloques del sistema que calcula la resistencia del estator mediante la lógica difusa.

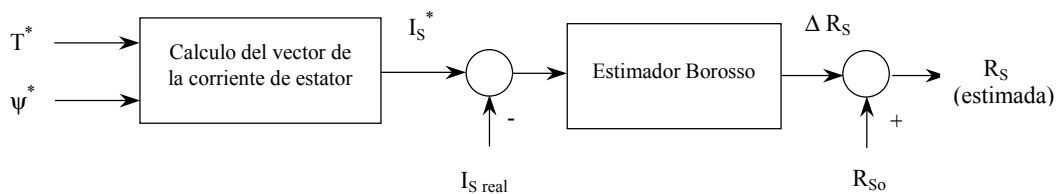


Fig. 5.3.2.1 Diagrama de bloques del estimador de la resistencia del estator

Las funciones de pertenencia del error de las corrientes se presenta en la figura 5.3.2.2, mientras que la variación de la resistencia se presenta por las funciones de pertenencia tal como se muestra en la figura 5.3.2.3. La selección de estas funciones de pertenencia y sus características se basa en el conocimiento del comportamiento del sistema obtenido mediante la realización de muchas simulaciones del sistema del DTC.

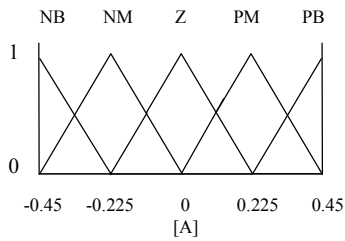


Fig. 5.3.2.2 Funciones de pertenencia del error de las corrientes: $I_s^* - I_{sreal}$

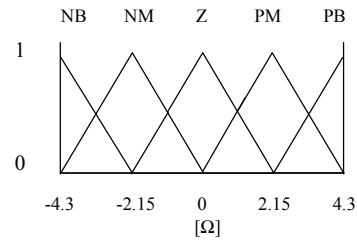


Fig. 5.3.2.3 Funciones de pertenencia del cambio de la resistencia

Se ha probado el método de estimar la resistencia con un motor de inducción de 1.35 kW. El valor nominal de la resistencia del estator es 4.59 Ω. La velocidad del motor se ha ajustado a 100 rpm con carga 1 N.m. Los resultados de simulación se presentan en las figuras siguientes. En la figura 5.3.2.4, la resistencia real del motor se ha variado de manera exponencial como ocurre en la realidad. La magnitud final es 150 % del valor nominal. La figura 5.3.2.5 muestra la respuesta del estimador borroso. Se puede observar que el estimador es capaz de detectar el cambio de la resistencia. Además, se ha examinado el comportamiento del estimador variando la resistencia del motor de forma lineal como se muestra en la figura 5.3.2.6. El estimador detectó la variación de la resistencia de estator y ofreció una respuesta satisfactoria, lo que pueda mejorar el comportamiento del DTC a velocidades bajas.

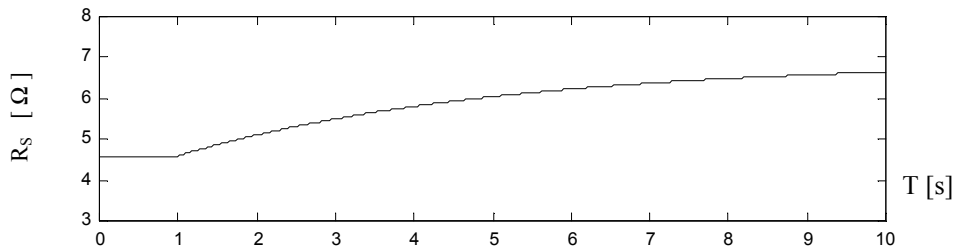


Fig. 5.3.2.4 Evolución temporal de la resistencia real del motor.

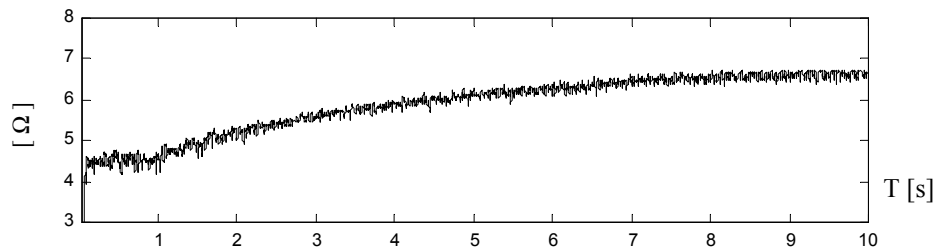


Fig. 5.3.2.5 Evolución temporal de la resistencia calculada por el estimador borroso

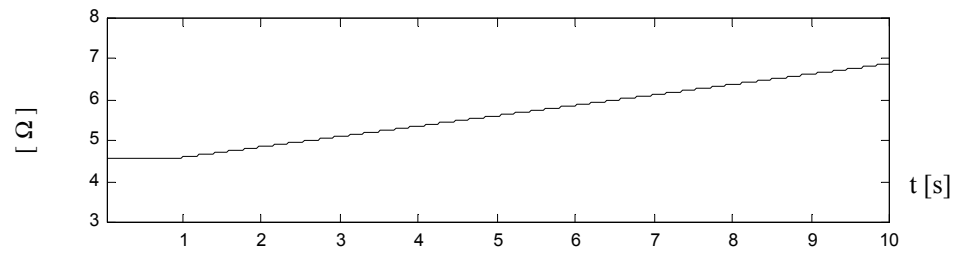


Fig. 5.3.2.6 Evolución temporal de la resistencia actual del motor.

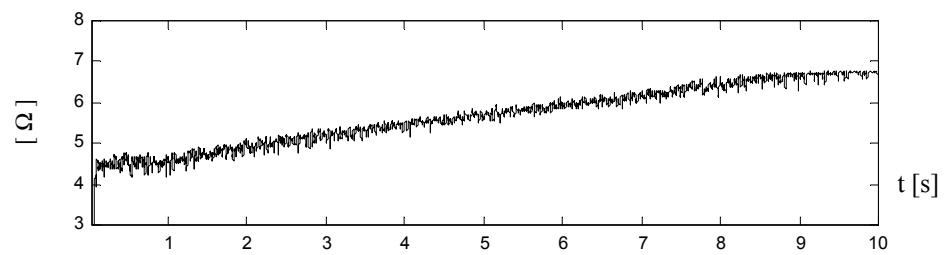


Fig. 5.3.2.7 Evolución temporal de la resistencia estimada por el estimador borroso

Según los resultados de simulación presentados anteriormente, la estimación de la resistencia por el control borroso es satisfactoria. Por tanto, el valor así obtenido se puede usar conjuntamente con el valor calculado durante el arranque del accionamiento para mejorar el comportamiento del DTC.