

# Motor trifásico de inducción para vehículos eléctricos

## Motor + inversor electrónico

Ing. Ricardo Berizzo  
UTN Regional Rosario  
rberizzo@gmail.com

El motor de tracción de los vehículos eléctricos es responsable de convertir la energía eléctrica en energía mecánica de tal manera que el vehículo se propulsa para superar la resistencia aerodinámica, la resistencia a la rodadura y la resistencia cinética.

Algunos ingenieros, e incluso investigadores, pueden considerar los motores de tracción afines o similares a los motores industriales. Sin embargo, los motores de tracción generalmente requieren un arranque/parada frecuente, una alta tasa de aceleración/desaceleración, un alto par de torsión y baja velocidad para subir pendientes, un bajo par de torsión y una alta velocidad de cruce y un rango de velocidad de operación muy amplio, mientras que los motores de uso industrial generalmente se optimizan en condiciones nominales. Por lo tanto, los motores de tracción son tan únicos que merecen formar una clase individual. Los requisitos generales del motor de tracción son significativamente diferentes de los motores trifásicos para aplicaciones industriales corrientes.

*Los motores de tracción son tan únicos que merecen formar una clase individual.*

Se amplía el concepto: dos motores de igual características (U, I, P, n), pero uno de ellos destinado a accionar un ascensor y otro, un ventilador, por ejemplo, no tienen por qué ser iguales. En el primer caso, el motor estará sometido frecuentemente a períodos de arranque, marcha y frenado; en el segundo caso, lo habitual es que, en funcionamiento, permanezca durante largo tiempo en servicio en el mismo régimen.

En consecuencia, los calentamientos que se producen en ambos motores no son iguales y eso puede afectar a su tamaño, sistema de ventilación, tipos de materiales, etc.



Figura 1. Distribución de flujo de la máquina

El incremento de temperatura sobre la del ambiente, que experimenta una máquina en servicio está provocado por el aporte de calor producida por las pérdidas: efecto joule, pérdidas en el hierro, etc.

La temperatura final dependerá de la capacidad de evacuar calor, tal capacidad aumenta con la superficie exterior. Se puede aumentar la evacuación forzándola por medio de refrigeración adicional como ventiladores o mediante la circulación interna de fluidos refrigerantes.

*Algunas de sus principales diferencias se encuentran en los requisitos de carga mecánica, las especificaciones de rendimiento y el entorno operativo.*

También, observamos que algunas de sus principales diferencias se encuentran en los requisitos de carga mecánica, las especificaciones de rendimiento y el entorno operativo, como por ejemplo:

- » Operación en un amplio rango de par y velocidad. Ello obliga a analizar el comportamiento del motor en todo el rango posible de funcionamiento, teniendo especial cuidado en el cálculo correcto del par, corriente, frecuencia de alimentación, etc., así como los efectos que ello produce: temperatura en las distintas partes de la máquina, par máximo en caso de motores de inducción, efecto pelicular y de proximidad en el devanado, corrientes de Foucault en imanes...
- » Volumen reducido disponible para el motor. Esto, sumado a la exigencia de los puntos de operación de la aplicación, conlleva a que las saturaciones magnéticas del diseño del motor sean elevadas, provocando que, para calcular correctamente el funcionamiento del motor, se necesiten modelos más complejos que los empleados tradicionalmente. Junto con las saturaciones magnéticas, la alta frecuencia fundamental de alimentación hace que se deba tener especial cuidado en el cálculo de las pérdidas en el hierro de la máquina.

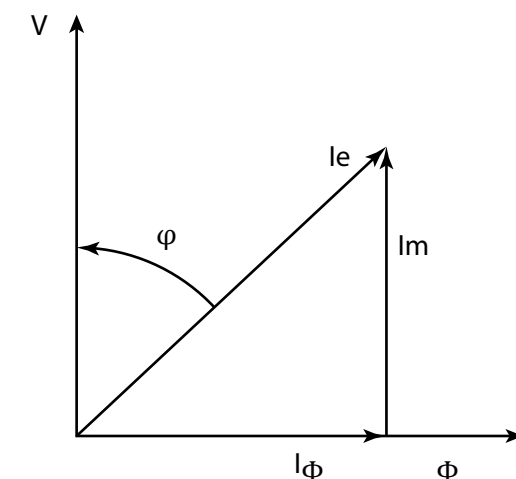


Figura 2. Diagrama fasorial

En una máquina eléctrica, el flujo magnético de cada polo tiene su camino a través de la culata del estator (yugo), de la masa polar, del entrehierro entre la masa polar y el inducido, de los dientes del inducido, del núcleo del inducido y luego se cierra a través de los dientes del inducido.

Este circuito magnético cerrado pasa dos veces a través del entrehierro, de los dientes y de la masa polar. En un motor trifásico de inducción el grado de saturación entre rotor y estator es diferente, ya que el diente y yugo de rotor se encuentran más saturados que el diente y yugo de estator, dado su diámetro menor.

El principio básico del método de control vectorial se encarga de independizar la magnetización de la máquina y el torque desarrollado. Si se analiza en el diagrama fasorial, "V" (tensión aplicada al estator del motor) vs. "Ø" (campo magnético resultante en el motor), observamos el fasor de corriente en el estator "Ie", cuyas componentes son descompuestas en dos: "IØ" como corriente magnetizante e "Im", corriente motriz, que es la que genera el par motor real.

El sistema de control electrónico corrige en todo momento el ángulo  $\phi$  en función de la velocidad



Figura 3. Bobinas de cobre

rotor del motor, manteniendo así el flujo, y consecuentemente el par aplicado.

Este ángulo se calcula por el inversor, funcionando en un lazo cerrado junto con un sensor de velocidad (encoder) que determina el desplazamiento entre rotor y estator. El encoder también se utiliza por el controlador para el sistema de frenado regenerativo.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que en técnicas de control vectorial por parte del inversor electrónico, el uso del modelo convencional del motor de inducción únicamente se justifica con flujo constante e igual al nominal. Cuando se requieren cambios en el nivel de flujo, el modelo lineal no proporciona resultados satisfactorios. El trabajo en la zona de debilitamiento de campo, o la optimización de determinadas magnitudes como el factor de potencia o el rendimiento, implican cambios en el nivel de flujo y demandan de una adecuada caracterización del comportamiento magnético de la máquina. El debilitamiento de campo no deseado demostrado por estos motores no especialmente diseñados para tracción, disminuye el par disponible para los requerimientos de la conducción.

En la literatura especializada, se señala la conveniencia de modelar adecuadamente este fenómeno de la saturación magnética para el correcto diseño del inversor, en lo referente a la impedancia que

presenta el motor saturado a los distintos armónicos presentes en la alimentación.

En referencia a las temperaturas, las bobinas de cobre son aisladas con polímeros especiales (como mínimo, clase H 180°) que facilitan la transferencia de calor y garantizan la fiabilidad en las exigencias de la conducción de alto rendimiento en condiciones extremas. Las altas corrientes de estator significan altas corrientes de rotor, a diferencia de los motores de inducción típicos que emplean aluminio para sus conductores, los conductores del rotor (barras) son de cobre.

El cobre, aunque más difícil de trabajar, tiene una resistencia mucho menor y por lo tanto puede manejar corrientes más altas en un volumen menor. Se tiene especial cuidado en el diseño del motor para manejar altas revoluciones por minuto (por ejemplo, 14.000 rpm).

A modo de ejemplo, se adjuntan datos del motor que diseñó Tesla Motor para sus vehículos:

- » Inducción trifásico refrigerado por aire
- » 185 kW pico
- » Cuatro polos
- » 14.000 rpm máx.
- » Par máximo 270 Nm, que se obtiene en el rango 0-6000 rpm
- » Eficiencia: 90% promedio, el 80% en potencia pico
- » Aleación de aluminio y rodamientos de cerámica

### Conclusiones

Como conclusión, podemos decir que todos los puntos enunciados brevemente más arriba pone en evidencia algo que se manifiesta en la práctica. Hermanar un motor trifásico con un inversor electrónico que no fueron diseñados para tracción eléctrica da como resultado una prestación mucho más pobre en lo referente a potencia, par y eficiencia motriz. Lo cual converge en un rendimiento mucho menor de la energía disponible, que redundará en la atenuación de la autonomía del vehículo. ■