

1. Control de velocidad de motores de inducción trifásicos

Se procedió a analizar el circuito con el cual se realiza un control sobre un motor trifásico.

1.1. Análisis a lazo abierto

1.1.1. Análisis de las señales en el encendido y cuando se aplica un escalón de torque

En esta etapa, vamos a realizar un análisis sobre el circuito a lazo abierto. Para ello, se dispuso del circuito de la siguiente forma:

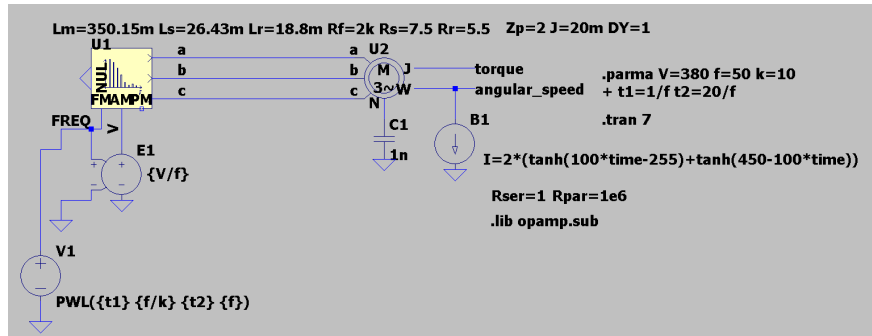


Figura 1: Diagrama del circuito a lazo abierto

Una vez configurado el generador con $N=2k+1$ a fin de insertar los armónicos impares en la tensión de línea, obtuvimos los siguientes resultados:

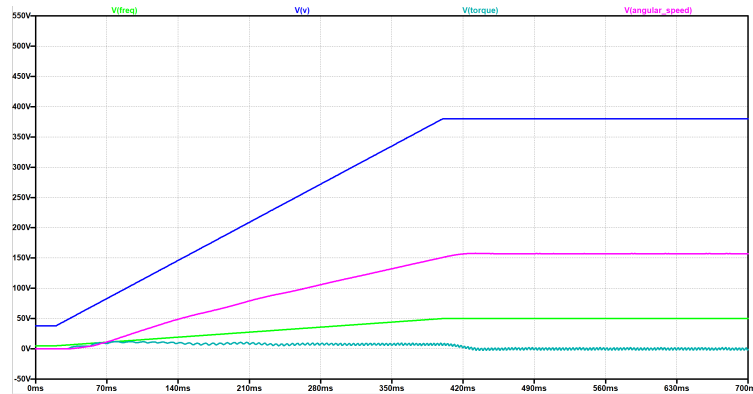


Figura 2: Simulación del encendido del circuito

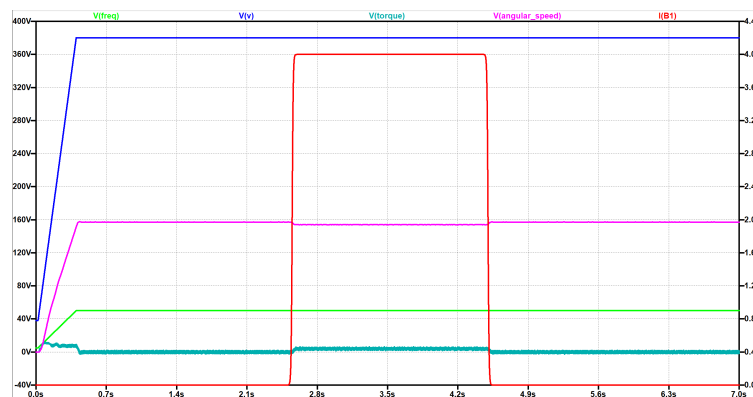


Figura 3: Simulación del circuito con escalón de torque

En la figura podemos observar cómo se comportan las señales de frecuencia del motor $V(freq)$, su velocidad angular $V(angular_speed)$, el torque $V(torque)$, la carga $I(B)$ y la tensión $V(v)$.

Ni bien se enciende el circuito (Ver Figura 2), observamos como la tensión de la línea sube de forma lineal desde 0 a 380V, y de igual manera, suben la frecuencia y la velocidad angular. Esto ocurre debido a que mantenemos $\frac{V}{f}$ constante. Como el motor es de tipo asincrónico, es fundamental mantener este factor constante, puesto que si esto no ocurre, el flujo magnético que se forma dentro del motor no es constante. Darle toda la tensión (380V) cuando estamos trabajando a baja frecuencia ocasiona que la curva de torque tenga un pico importante al principio, desgastando al motor y disminuyendo su vida útil.

Cuando el motor se encuentra girando a su velocidad máxima, el torque disminuye a cero. Observamos que en ese instante, la tensión $V(v)$ ya se encuentra en los 380V deseados, y la frecuencia se encuentra constante en 50V (medidos). En siguiente sección se realiza una interpretación de los valores obtenidos en LTSpice.

Una vez que tenemos el motor girando a máxima velocidad, mediante el drenaje de una corriente $I(B)$ lo que hacemos es simular un escalón torque (resistencia) que se le coloca al motor (Ver Figura 5).

Cuando cargamos al motor en el momento en que $I(B)$ sube, lo que ocurre es que el motor sufre una merma en su velocidad, es decir frena; y a su vez el torque aumenta hasta que ambos valores se estabilizan nuevamente. Estas variaciones se arrojaron valores de $\Delta V_{angular_speed} = 3.12V$ y $\Delta V_{torque} = 1.795V$.

Cuando la carga es liberada (es decir se deja de drenar corriente), ocurre el efecto opuesto, disminuyendo el torque a cero y aumentando la velocidad angular a la original. Esto ocurre como consecuencia de que siempre mantuvimos el factor $\frac{V}{f}$ constante.

1.1.2. Interpretación de variables físicas del Spice

Si bien las variables mencionadas anteriormente fueron obtenidas en tensiones debido a que así es como están modeladas en LTSpice, lo que ocurre es que esos valores de tensión representan unidades del SI. A continuación indicamos cuáles son esas unidades a las que representan:

Variable medida	Unidad Representada	Relación unidad/V
Frecuencia	Hz	1
Torque	$kg \cdot m^2$	1
Velocidad Angular	RPM	60
Carga (Torque)	$kg \cdot m^2$	1

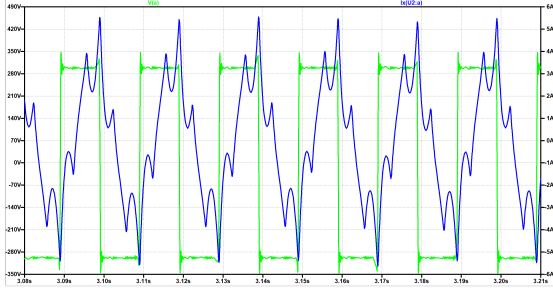
Tabla 1: Tabla de interpretación de las unidades tomadas del LTSpice

Los valores en el sistema SI de unidades que opera el motor sin carga:

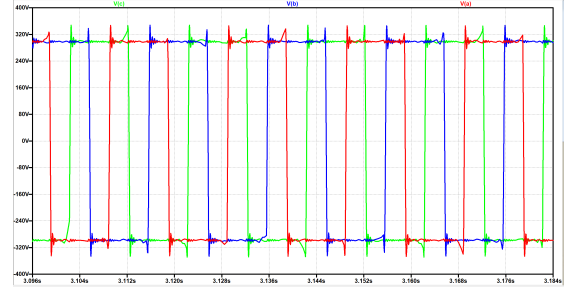
	Valor	Unidad
Velocidad Angular	9420	rpm
Torque	2.1	$m \cdot kgf \cdot m^2$
Frecuencia	50	Hz
Tensión	380	V

1.1.3. Corriente de fase y tensión de línea

Si analizamos las tensiones de línea y corriente de fase, obtenemos los siguientes gráficos:



(a) Tensión de línea y corriente de fase en b



(b) Tensiones de línea

Figura 4: Corriente de fase y tensión de línea

Podemos observar que la tensión de línea tiene un valor de tensión $V_{RMS} = 297.04V$, con picos de tensión de $V_{max} = 345V$ y una tensión $V_{on} = 300V$. Las señales se encuentran desfazadas 120° entre sí, y la forma que poseen se debe a la presencia de armónicos. La fuente fue configurada para que entregue una señal con armónicos impares.

Por otro lado, la corriente de fase tiene un valor de $I_{RMS} = 2.59A$, con picos de $I_{max} = 5.4A$.

1.2. Análisis a lazo cerrado

En esta etapa, vamos a realizar el análisis a lazo cerrado modificando el circuito como se encuentra en la consigna.

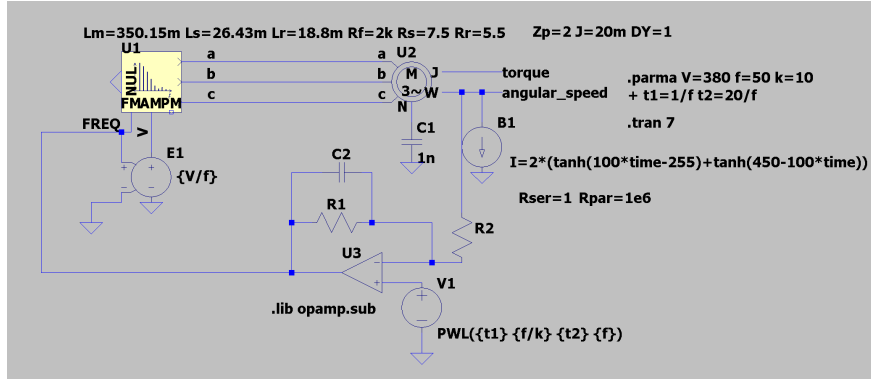


Figura 5: Circuito realimentado

Observamos al cerrar el lazo, lo que tenemos que diseñar es un control PI (proporcional integrativo). La función transferencia de dicho PI es la siguiente:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{1}{sR_1C_2 + 1}$$

1.3. Comportamiento de la velocidad angular

Manteniendo $C2 = 4.7\mu F$, se simuló la velocidad angular para distintos valores de resistencia $R1 = R2$. De esta forma, obtuvimos tres comportamientos distintos:

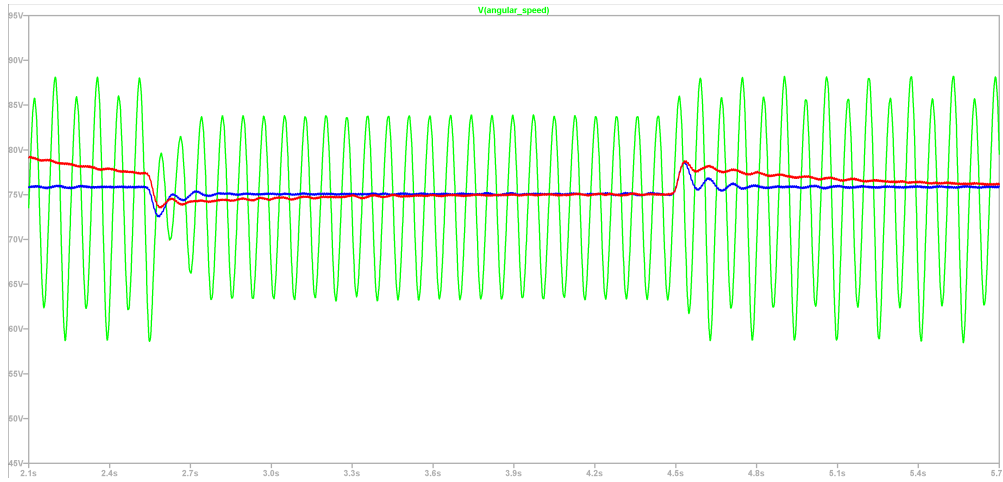


Figura 6: Simulación del circuito realimentado para distintas $R1=R2$

Señal	Valor de $R1=R2$	Comportamiento
Verde	4.7k	No llega a regular la velocidad angular
Azul	47k	Velocidad angular subamortiguada
Roja	500k	Velocidad angular sobreamortiguada

Al simular con los valores de componentes obtenidos para una respuesta subamortiguada, se obtuvo el siguiente comportamiento del circuito realimentado.

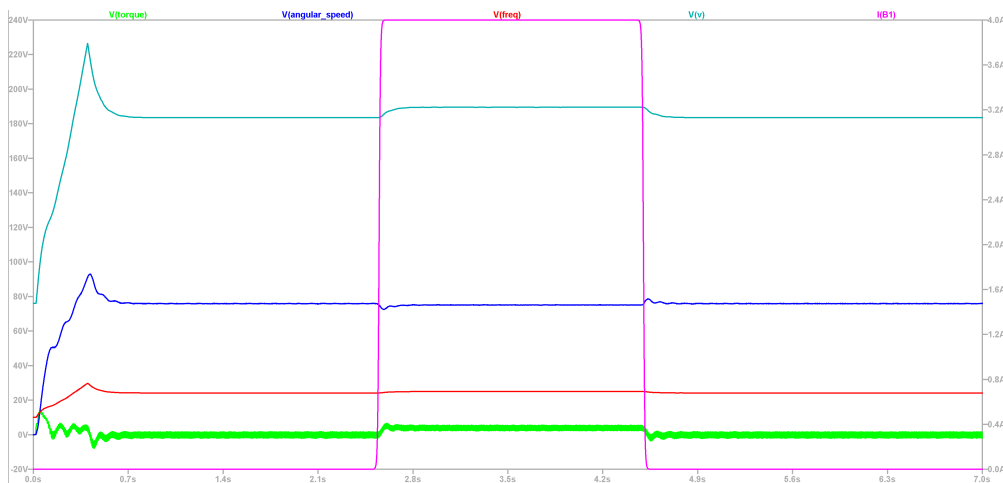


Figura 7: Simulación del circuito realimentado

Lo que sucede ahora cuando se aplica el escalón de torque es que la velocidad angular cae por aproximadamente 120ms y luego vuelve a restablecerse al valor inicial. Lo mismo sucede cuando el escalón de torque cae: la velocidad angular aumenta por algunos milisegundos hasta que vuelve a su valor original. En ambos casos, lo hace con un comportamiento subamortiguado.

Esto ocurre porque el circuito se encuentra realimentado y, cuando ocurre un escalón de torque, la tensión sobre el motor aumenta junto con la frecuencia a la salida del inverter para mantener el factor $\frac{V}{f}$ constante. En otras palabras, lo que está sucediendo es que se está corriendo la curva de torque del motor hacia la derecha.

1.4. Torque máximo del sistema para un comportamiento sobreamortiguado de la velocidad angular

El escalón de torque máximo se da con un escalón de corriente B1 de 20A.

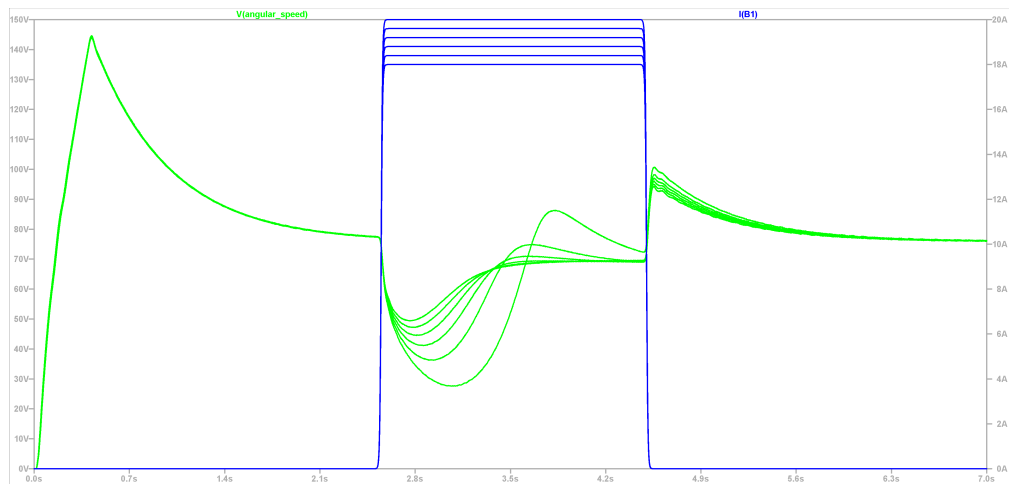


Figura 8: Simulación del torque máximo