

Angel Salas Fornons

**Simulació del comportament d'un motor
d'inducció trifàsic mitjançant PSIM**

TREBALL DE FI DE GRAU

dirigit pel Prof. Luis Guasch Pesquer

Grau d'Enginyeria Elèctrica



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2015

Índex

Llistat de símbols	7
1 Introducció	9
1.1 Objecte	9
2 Motor d'inducció trifàsic, aspectes generals.....	10
2.1 Utilització en els accionaments elèctrics industrials.....	10
2.2 Principi de funcionament	10
2.3 Circuit equivalent en règim permanent.....	11
2.4 Enggada per mètodes clàssics	11
2.5 Enggada per variació de l'amplada i la freqüència de la tensió	12
3 Motor d'inducció trifàsic, model matemàtic.....	14
3.1 Introducció	14
3.2 Gàbia senzilla en règim dinàmic i paràmetres constants	14
3.3 Gàbia senzilla amb paràmetres constants, règim permanent	15
3.4 Doble gàbia, règim dinàmic i règim permanent.....	16
3.5 Model i paràmetres del motor seleccionat	17
3.5.1 Model matemàtic per gàbia senzilla en règim dinàmic i paràmetres constants	17
3.5.2 Motor seleccionat	19
3.5.3 Paràmetres del circuit equivalent.....	19
4 Esquemes i paràmetres dels assaigs realitzats	21
4.1 Introducció	21
4.2 Esquema amb font de tensió sinusoïdal amb valor eficaç i freqüència constants	22
4.3 Esquema amb font de tensió quadrada.....	23
4.4 Esquema amb font de tensió PWM.....	26
4.5 Esquemes amb font de tensió sinusoïdal amb valor eficaç i freqüència variables	32
4.5.1 Relació amplada freqüència, cas A.....	33

Índex

4.5.2	Relació amplada freqüència, cas B.....	36
4.5.3	Relació amplada freqüència, cas C.....	38
4.5.4	Relació amplada freqüència, cas D.....	40
4.6	Paràmetres del motor	42
4.7	Paràmetres de la càrrega	43
4.8	Paràmetres de simulació	44
5	Anàlisi dels resultats dels assaigs	46
5.1	Introducció	46
5.2	Corrents d'engegada	47
5.3	Corrents eficaços de règim permanent.....	48
5.4	Velocitat mecànica en règim permanent.....	49
5.5	Temps d'engegada	50
5.6	Parell màxim	51
5.7	Parell mig en règim permanent	52
5.8	Factor d'arissat	52
5.9	Harmònics.....	55
5.9.1	Distorsió Harmònica de intensitat i tensió.....	57
6	Conclusions	59
7	Referències	60
8	Annexes	61
8.1	Gràfiques de corrent.....	61
8.1.1	Càrrega mecànica en buit	61
8.1.2	Càrrega mecànica constant	63
8.1.3	Càrrega mecànica parabòlica.....	65
8.2	Gràfiques de velocitat	67
8.2.1	Càrrega mecànica en buit	67
8.2.2	Càrrega mecànica constant	69
8.2.3	Càrrega mecànica parabòlica.....	71
8.3	Gràfiques de parell.....	73
8.3.1	Càrrega mecànica en buit	73

Índex

8.3.2	Càrrega mecànica constant	75
8.3.3	Càrrega mecànica parabòlica.....	77
8.4	Gràfiques d'harmònics de intensitat i de tensió.....	80
8.4.1	Ona Quadrada.....	80
8.4.2	Ona PWM.....	80
8.5	Comparació entre comportament real i simulat.....	82
8.5.1	Introducció.....	82
8.5.2	Característica mecànica del motor d'inducció.....	82
8.5.3	Càlcul del comportament mecànic	83
8.5.4	Anàlisi entre la característica mecànica real i simulada	86
8.6	Punt de funcionament nominal	87

Llistat de símbols

k_1	Coeficient lineal de la càrrega mecànica.
k_2	Coeficient quadràtic de la càrrega mecànica.
k_3	Coeficient cúbic de la càrrega mecànica.
THD_v	Distorsió harmònica de tensió.
THD_i	Distorsió harmònica de intensitat.
TRF	Factor d'arissat.
f_m	Freqüència de l'ona modulant.
f_p	Freqüència de l'ona portadora.
ω_s	Freqüència de sincronisme.
Z_{th}	Impedància Thévenin.
M	Punt d'operació de màxim parell.
L_s	Inductància a l'estator.
L_r	Inductància al rotor.
L_m	Inductància magnetitzant.
M_{sr}	Inductància mútua entre els debanats de l'estator i el rotor.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
IM	Induction Motor
I_{rms}	Intensitat eficaç.
$i_{abc,s}$	Intensitat per fase a l'estator.
$i_{abc,r}$	Intensitat per fase al rotor.
T_L	Parell de càrrega.
T_{em}	Parell intern de la màquina d'inducció.
PWM	Pulse Width Modulation.
O	Punt d'operació d'engegada.
M	Índex de modulació.
N	Punt d'operació en condicions nominals.
X_s	Reactància de dispersió del estator.
X_r	Reactància de dispersió del rotor.
X_m	Reactància de dispersió magnetitzant.
X_{th}	Reactància Thévenin.
R_s	Resistència a l'estator.

Llistat de símbols

R_r	Resistència al rotor.
R_{th}	Resistència Thévenin.
V_m	Tensió de pic a pic de l'ona modulant.
V_p	Tensió de pic a pic de l'ona portadora.
$V_{abc,s}$	Tensió per fase a l'estator.
$V_{abc,r}$	Tensió per fase al rotor.
V_{th}	Tensió Thévenin.
n_s	Velocitat de sincronisme.
ω_m	Velocitat mecànica.
n_n	Velocitat nominal del motor.
S	Punt d'operació de sincronisme.
s	Lliscament.
J	Moment d'inèrcia.
P	Potència mecànica en l'eix.
p	Índex de freqüència.
t	Temps d'engegada.

1 Introducció

1.1 Objecte

La finalitat del present projecte és l'estudi del motor d'inducció trifàsic a través d'una aplicació informàtica que simuli el comportament en règim dinàmic. Es partirà d'un model matemàtic de la màquina d'inducció trifàsica per a l'estudi del comportament en règim dinàmic en funcionament com a motor. Prèviament en aquest estudi, s'ha efectuat una introducció teòrica sobre el funcionament del motor.

L'estudi es basa en l'observació de diferents gràfiques obtingudes en els diferents tipus de sistemes realitzats.

Agafant com a base l'article tècnic "Improved estimation of induction machine" d'Akbaba s'adoptaran els paràmetres del model del motor d'inducció.

Un cop analitzat el motor escollit, s'estudiarà la resposta a la maniobra de posta en marxa directa, en funció de diferents sistemes de fonts de tensió. Aquest motor accionarà a tres tipus de càrregues mecàniques.

Per a realitzar les simulacions es dissenyaran els circuits en l'aplicació PSIM i s'establiran una sèrie de criteris per a la seva comparació. Després d'executar els corresponents assaigs, s'obtindran gràfics com a resposta. A partir d'aquests gràfics es reuniran les variables d'interès en taules i s'analitzaran les dades resultants.

2 Motor d'inducció trifàsic, aspectes generals

2.1 Utilització en els accionaments elèctrics industrials

La màquina d'inducció trifàsica és la màquina rotativa més àmpliament utilitzada en el sector industrial i domèstic degut al seu baix cost i manteniment, a més de les seves altes prestacions.

El motor d'inducció s'ha convertit a més en l'accionament de velocitat variable per excel·lència, degut a les seves altes prestacions dinàmiques que s'obtenen amb les estratègies de control aplicades als variadors que alimenten als motors d'inducció.

Així doncs, aquests accionaments són els més importants en aplicacions industrials.

2.2 Principi de funcionament

La màquina d'inducció està formada per un estator i un rotor. En l'estator normalment es col·loca l'inductor, alimentat per una xarxa monofàsica o trifàsica. En canvi, el rotor és l'induït, on les corrents que circulen són conseqüència de la interacció amb el flux de l'estator.

L'estator està format per un apilament de xapes d'acer que disposen d'unes ranures en les quals es disposa el debanat trifàsic distribuït i desfasat 120° especialment, alimentant per una corrent del mateix tipus, de tal manera que s'obté un flux giratori.

El rotor està constituït per un conjunt de xapes apilades, formant un cilindre o una gàbia d'esquirol.

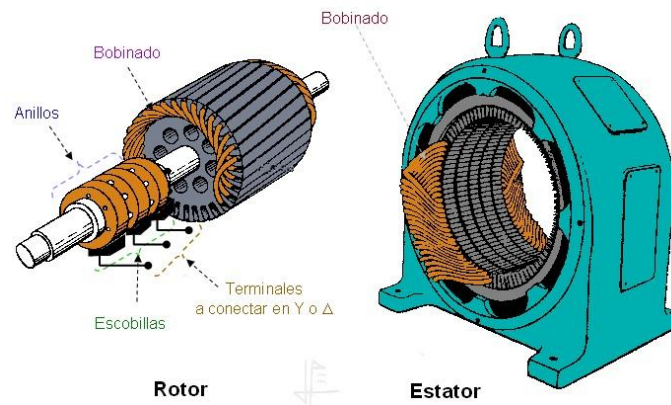


Figura 2.1 Rotor i estator de màquina d'inducció

En un motor d'inducció, els corrents que circulen per l'estator generen un camp magnètic giratori que gira a la velocitat de sincronisme i els pols del rotor són induïts per acció de transformador, i també giren a la velocitat de sincronisme.

El rotor gira físicament a una velocitat lleugerament menor que la velocitat de sincronisme, i la velocitat de gir es redueix lleugerament a mesura que el parell de càrrega i les necessitats de potència augmenten.

2.3 Circuit equivalent en règim permanent

Els motors d'inducció depenen de la inducció de tensions i corrents en el circuit del rotor des de el circuit del estator. La inducció de tensions i corrents en el circuit del rotor d'un motor d'inducció és essencialment una operació transformadora.

El circuit equivalent té com a objectiu analitzar el comportament de la màquina a partir del circuit elèctric que tradueixi, de la manera més aproximada, el comportament real del motor.

Es possible obtenir el circuit equivalent per una fase, amb el fet de que podem aconseguir les tensions i corrents de les fases restants mitjançant un desplaçament de fase, és a dir, $\pm 120^\circ$ en el cas de una màquina trifàsica.

Per obtenir el circuit equivalent per fase, es necessari referir en l'estator, el model del rotor.

L'estator tindrà una resistència del debanat (R_s) i una reactància de dispersió (X_s), junt amb la resistència del nucli i una reactància magnetitzant (X_m).

El circuit equivalent de rotor consisteix en que en el debanat, la resistència del rotor (R_r) està en sèrie amb la reactància del rotor (X_r).

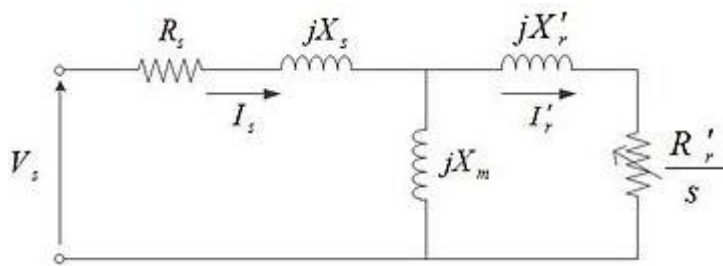


Figura 2.5 Circuit equivalent IM en règim permanent

2.4 Engegada per mètodes clàssics

L'engegada és el procés de posta en marxa d'una màquina elèctrica. En el cas del motor d'inducció, per a que aquesta operació es pugui portar a cap, és precís, que el parell d'engegada sigui superior al parell resistent de la càrrega. D'aquesta forma s'obté un moment d'acceleració que obliga a girar al motor a una velocitat cada cop més elevada, arribant al règim permanent quan s'igualen els parells motor i resistent. El procés d'engegada ve acompanyat d'un consum elevat de corrent.

L'engegada per mètodes clàssics, en aquest projecte serà l'engegada directa (connectant-lo directament a la xarxa), és la manera més simple d'engegar un motor de gàbia d'esquirol. A pesar dels avantatges que té aquest mètode com la senzillesa de l'equip, una engegada ràpida, un elevat parell d'engegada i un baix cost, també té una sèrie d'inconvenients com és una engegada brusca, on el corrent i el parell sol·licitats en l'engegada són molt elevats, i es produeix un pic important.

En aquests casos, per minimitzar-ho el mètode més utilitzat consisteix en engegar el motor variant la tensió d'alimentació.

2.5 Engegada per variació de l'amplada i la freqüència de la tensió

Un dels mètodes més utilitzats per realitzar una engegada més progressiva regulant la velocitat dels motors en gàbia d'esquirol és regular el flux de la màquina, el qual s'aconsegueix amb un control simultani del valor eficaç i la freqüència d'alimentació.

Els motors es fabriquen per a una velocitat nominal o de treball determinada, però mitjançant el variador de freqüència, aquesta velocitat pot controlar-se de manera progressiva. Aquesta condició és possible si la tensió d'alimentació al estator del motor varia de forma proporcional amb la freqüència d'alimentació. Per a l'engegada d'un motor amb càrrega, és necessari aplicar un cert parell inicial mínim, i garantir que el motor comenci a girar. Això s'aconsegueix iniciant la posta en marxa amb una relació entre la amplitud i la freqüència (V/f) constant.

Si analitzem amb més detall la relació entre la rotació, la freqüència d'alimentació, el nombre de pols i el lliscament d'un motor d'inducció obeeix a la següent equació:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad (2.1)$$

On:

n : velocitat de rotació mecànica (rpm)

f : freqüència fonamental de la tensió d'alimentació (Hz)

p : nombre de pols

s : lliscament

L'anàlisi de l'expressió demostra que es pot actuar en tres paràmetres, per variar la velocitat de un motor d'aquest tipus. La utilització de convertidors de freqüència actualment és el mètode més eficient per controlar la velocitat dels motors d'inducció. Els convertidors transformen la tensió de la xarxa, d'amplitud i freqüència constants, en una tensió d'amplitud i freqüència variable. Amb la variació de la freqüència de la tensió d'alimentació, es varia també la velocitat del camp giratori i consegüentment la velocitat mecànica de rotació de la màquina.

El parell desenvolupat per el motor d'inducció segueix l'equació:

$$T = k \cdot \phi_m \cdot I \quad (2.2)$$

I el seu flux de magnetització:

$$\phi_m = k \cdot \frac{V}{f} \quad (2.3)$$

On:

T : par de l'eix (Nm)

ϕ_m : flux de magnetització (Wb)

Motor inducció trifàsic, aspectes generals

I: corrent rotòrica (A)

V: tensió estatòrica (V)

k: constant

3 Motor d'inducció trifàsic, model matemàtic

3.1 Introducció

Els models matemàtics del motor d'inducció trifàsic es poden representar mitjançant circuits elèctrics equivalents en els quals els seus elements es caracteritzen mitjançant paràmetres. Aquests models es poden diferenciar per l'anàlisi en règim permanent o en règim dinàmic.

En règim permanent la solució del model matemàtic és analítica, amb equacions no diferencials. En canvi, en règim dinàmic trobem equacions diferencials amb solució numèrica. En qualsevol cas els paràmetres dels circuit equivalent són els mateixos, apareixent en el cas del circuit equivalent per règim dinàmic unes fonts de tensió dependents.

En aquest treball s'utilitza el model matemàtic en règim dinàmic definit per la màquina d'inducció al software PSIM.

Existeixen diferents models per caracteritzar la màquina d'inducció. Aquests models depenen de l'aplicació en que es treballi. Els models més comuns són els següents:

- Gàbia senzilla en règim en dinàmic i paràmetres constants.
- Gàbia senzilla en règim permanent i paràmetres constants.
- Doble gàbia en règim dinàmic i paràmetres constants.
- Doble gàbia en règim permanent i paràmetres constants.

Aquesta mateixa classificació és podria duplicar en el cas de considerar alguns dels paràmetres del model variables (per exemple funció del lliscament). Aquests models són menys utilitzats per la seva complexitat, la gran heterogeneïtat de propostes, i la poca millora en els resultats que presenten en la zona estable de funcionament.

3.2 Gàbia senzilla en règim dinàmic i paràmetres constants

El model dinàmic de gàbia d'esquirol senzilla amb paràmetres constants s'utilitza per analitzar fenòmens transitoris. Serà el model escollit per a l'estudi, ja que, analitzarem el comportament des de l'engegada del motor fins al règim permanent.

En aquest treball no es desenvolupa el model matemàtic, s'utilitza un element del programa PSIM que ja l'incorpora, i només cal especificar els paràmetres del motor escollit.

En el model de PSIM apareixen cinc paràmetres constants que són la resistència a l'estator (R_s) i al rotor (R_r), inductàncies de dispersió a l'estator (L_s) i al rotor (L_r), i la inductància magnetitzant (L_m).

L'inconvenient d'aquest model és que no s'ajusta gaire bé al punt inicial O de l'engegada que indica el fabricant però, d'altra banda si s'aproxima de manera notable a la zona estable N .

- El circuit equivalent en règim dinàmic ve representat per la següent figura:

Aquest model com podem observar en la Figura 3.1 utilitza un circuit equivalent amb fonts de tensió dependents.

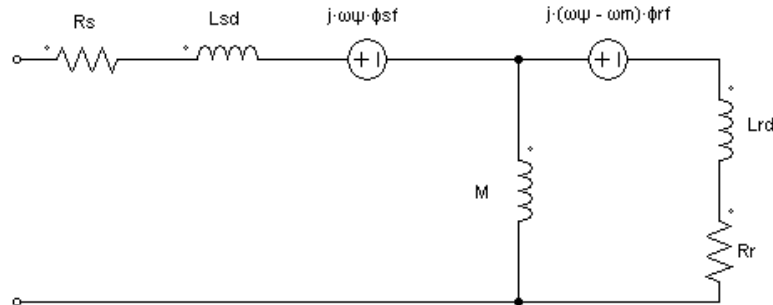


Figura 3.1 Circuit equivalent gàbia d'esquirol senzilla en règim dinàmic

3.3 Gàbia senzilla amb paràmetres constants, règim permanent

Aquest model dimana de l'anterior amb la diferència principal de que és per l'anàlisi del motor en règim permanent. Com ens interessa fer l'estudi des de l'engegada fins que s'estabilitza no s'ha escollit aquest model.

El model de la Figura 3.2 esmentat també utilitza els mateixos paràmetres que són la resistència a l'estator i al rotor, la inductància a l'estator i al rotor, i la inductància magnetitzant. Però en aquest cas no s'utilitzen fonts dependents.

- El circuit equivalent en règim permanent ve representat per la següent figura:

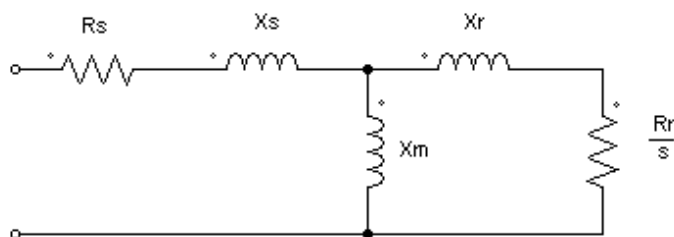


Figura 3.2 Circuit equivalent gàbia d'esquirol senzilla en règim permanent

3.4 Doble gàbia, règim dinàmic i règim permanent

Un altre model del motor d'inducció de rotor de gàbia d'esquirol és el model de doble gàbia. És un model més precís però per a la resolució del model, s'ha de solucionar un sistema no lineal de cinc equacions. No s'ha escollit aquest model ja que no es troba en el software utilitzat per aquest estudi.

A continuació podem veure el circuit equivalent d'aquest model per als diferents règims.

- El circuit equivalent de la doble gàbia en règim dinàmic queda representat en la següent figura:

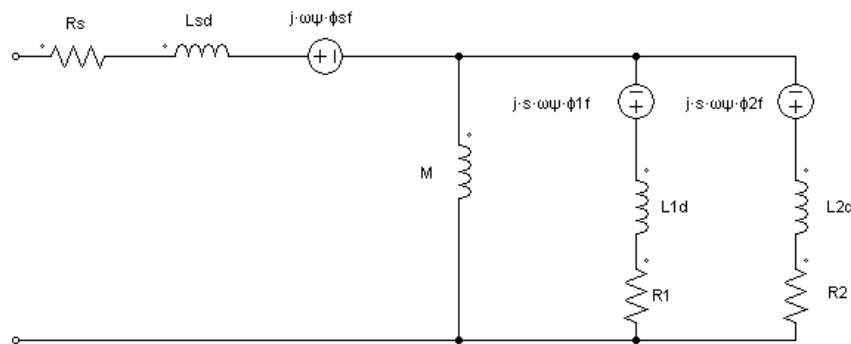


Figura 3.5 Circuit equivalent doble gàbia en règim dinàmic

- El circuit equivalent de la doble gàbia en règim permanent queda representat en la següent figura:

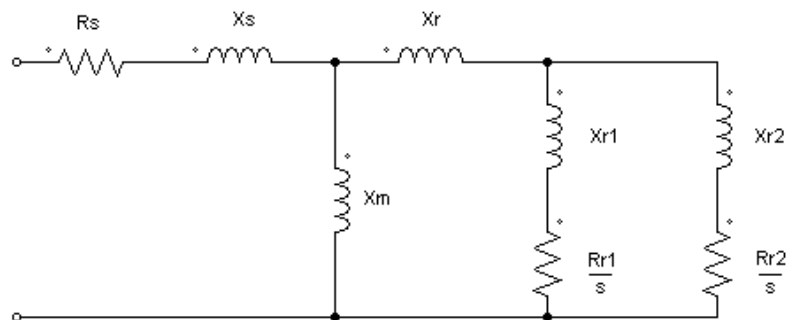


Figura 3.6 Circuit equivalent doble gàbia en règim permanent

3.5 Model i paràmetres del motor seleccionat

3.5.1 Model matemàtic per gàbia senzilla en règim dinàmic i paràmetres constants

El funcionament d'una màquina d'inducció de gàbia senzilla de tres fases utilitzat per el simulador PSIM en règim dinàmic es descriu en les següents equacions diferencials:

Les tensions per fase del estator $v_{abc, s}$ i les tensions per fase del rotor estan definides com:

$$[v_{abc, s}] = [R_s] \cdot [i_{abc, s}] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} [i_{abc, s}] + [M_{sr}] \cdot \frac{d}{dt} [i_{abc, r}] \quad (3.1)$$

$$[v_{abc, r}] = [R_r] \cdot [i_{abc, r}] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt} [i_{abc, r}] + [M_{sr}]^T \cdot \frac{d}{dt} [i_{abc, s}] \quad (3.2)$$

On:

$$[v_{abc, s}] = \begin{bmatrix} v_{a, s} \\ v_{b, s} \\ v_{c, s} \end{bmatrix} \quad [v_{abc, r}] = \begin{bmatrix} v_{a, r} \\ v_{b, r} \\ v_{c, r} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

On $i_{abc, s}$ i $i_{abc, r}$ és la intensitat per fase del estator i del rotor, respectivament.

$$[i_{abc, s}] = \begin{bmatrix} i_{a, s} \\ i_{b, s} \\ i_{c, s} \end{bmatrix} \quad [i_{abc, r}] = \begin{bmatrix} i_{a, r} \\ i_{b, r} \\ i_{c, r} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Per a màquines de gàbia senzilla en règim dinàmic i paràmetres constants, les tensions per fase del rotor $v_{a,r} = v_{b,r} = v_{c,r} = 0$. Les matrius paràmetres estan definides tal:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s + M_{sr} & -\frac{M_{sr}}{2} & -\frac{M_{sr}}{2} \\ -\frac{M_{sr}}{2} & L_s + M_{sr} & -\frac{M_{sr}}{2} \\ -\frac{M_{sr}}{2} & -\frac{M_{sr}}{2} & L_s + M_{sr} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r + M_{sr} & -\frac{M_{sr}}{2} & -\frac{M_{sr}}{2} \\ -\frac{M_{sr}}{2} & L_r + M_{sr} & -\frac{M_{sr}}{2} \\ -\frac{M_{sr}}{2} & -\frac{M_{sr}}{2} & L_r + M_{sr} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$[M_{sr}] = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

On M_{sr} és la inductància mútua entre els debanats de l'estator i el rotor, i θ és l'angle de la part mecànica. La inductància mútua és relaciona amb la inductància magnetitzant (L_m) com:

$$L_m = \frac{3}{2} M_{sr} \quad (3.9)$$

La equació mecànica ve expressada com:

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} - T_L \quad (3.10)$$

On J és el moment d'inèrcia, ω_m és la velocitat mecànica en rad/s i T_L és el parell de càrrega. El parell intern T_{em} desenvolupat per la màquina d'inducció està definit com:

$$T_{em} = \frac{P}{2} \cdot [i_{abc, s}]^T \cdot \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \cdot [i_{abc, r}] \quad (3.11)$$

3.5.2 Motor seleccionat

El motor seleccionat és bàsicament un motor d'inducció de gàbia d'esquirol senzilla de 4 pols amb paràmetres constants de 75 kW de potència, els seus valors més importants es mostren a la Taula 3.1. En aquest treball s'ha fet treballar el motor amb 3 tipus de parells resistents: buit, constant i parabòlic.

Per a la realització del assajos amb el PSIM, s'han partit de les dades reflectides en la Taula 3.1, aquests valors s'han obtingut a partir de la referència [2].

Intensitat nominal	15,32 A
Tensió eficaç	3300 V
Potència mecànica en l'eix	75 kW
Freqüència d'alimentació	50 Hz
Número de pols	4 pols
Velocitat nominal	1455 rpm
Parell nominal	492,2 Nm
Moment d'inèrcia	1 kg·m ²

Taula 3.1 Característiques del motor d'inducció

3.5.3 Paràmetres del circuit equivalent

Per a l'estimació de paràmetres del motor d'inducció trifàsic, es poden utilitzar diverses tècniques com la tècnica d'estimació a partir de dades, ja sigui, a través de les dades del catàleg del fabricant o mitjançant l'assaig. Un altra tècnica per l'estimació de paràmetres és a través d'algoritmes, ja sigui en càlcul directe o per mitjà d'iteracions.

En aquest cas els paràmetres escollits s'han realitzat a través de la tècnica seguiment de parell-velocitat, que ve recollit en [1]. A l'hora de realitzar aquesta tècnica per a l'estimació de paràmetres s'ha d'implementar un algoritme. Aquest algoritme requereix un previ coneixement de les dades del fabricant que són la tensió d'alimentació, el número de pols de la màquina; la velocitat, la intensitat, la tensió, la potència i el parell tant sense càrrega, com en rotor bloquejat. A més de la velocitat, la intensitat, el parell i el factor de potencia a plena càrrega i en condicions de parell màxim.

A continuació podem observar la corba característica del motor escollit, a través de la representació dels 24 punts de funcionament, obtinguts a partir de proves experimentals.

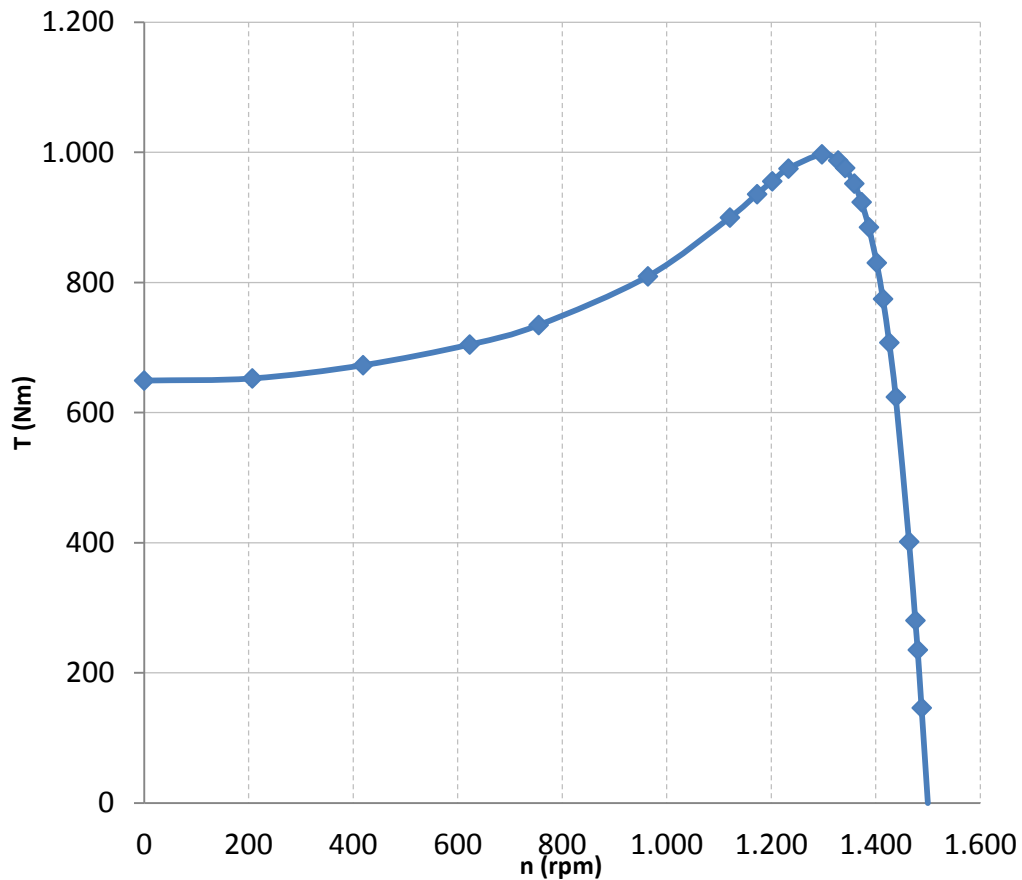


Figura 3.7 Característica real del motor seleccionat

A partir d'aquestes dades experimentals a la referència [2], i mitjançant un algoritme de càlcul s'obtenen els paràmetres del circuit equivalent que s'utilitzaran en aquest treball, i que es mostren a la Taula 3.2.

Resistència del estator	7,52 Ω
Resistència del rotor	3,513 Ω
Inductància del estator	0,04 H
Inductància del rotor	0,04 H
Inductància magnetitzant	1,838 H

Taula 3.2 Paràmetres del circuit equivalent

4 Esquemes i paràmetres dels assaigs realitzats

4.1 Introducció

En aquest apartat realitzarem una sèrie d'assaigs amb l'objectiu d'analitzar el comportament del motor d'inducció. Es tractarà d'examinar la resposta del motor a diferents sistemes d'engegada directa en funció d'unes fonts de tensió, i a tres tipus de càrregues mecàniques.

Per realitzar els assaigs d'aquest projecte s'ha treballat amb l'aplicació PSIM. En aquesta aplicació s'han de dissenyar els circuits a assajar, indicar els paràmetres de cada element i, finalment, seleccionar els paràmetres de la simulació.

En funció de les fonts de tensió utilitzades, s'ha treballat amb 4 tipus d'esquemes:

- Sinusoïdal amb valor eficaç i freqüència constants.
- Rectangular.
- Ona PWM (Pulse Width Modulation) de 3, 9, 15 i 33 polsos/semiperíode.
- Sinusoïdal amb valor eficaç i freqüència variables.

Aquest motor acciona tres càrregues mecàniques, totes elles amb un moment d'inèrcia de la càrrega de $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$:

- En buit (parell resistent zero)
- Parell resistent constant
- Parell resistent parabòlic

En els assaigs que es realitzaran per comparar el comportament del motor per als diferents sistemes, s'ha elegit la maniobra d'engegada. En tots els casos la tensió del motor en règim permanent (un cop finalitzada l'engegada) és de 3300 V i 50 Hz.

Per l'estudi i comparació dels diferents assaigs s'han elegit unes variables d'interès com: temps d'engegada (per veure quin sistema té una resposta més ràpida); el corrent màxim; el parell màxim; el valor eficaç del corrent durant l'engegada; el parell mig durant l'engegada. A més de l'anàlisi dels harmònics en els casos on l'ona no és sinusoïdal.

Per poder obtenir la resposta temporal dels corrents, parells motor i resistent, i velocitat del motor d'inducció trifàsic quan es realitza la maniobra de posta en marxa, s'han col·locat sensors de tensió, corrent, velocitat i parell mecànic.

4.2 Esquema amb font de tensió sinusoïdal amb valor eficaç i freqüència constants

L'esquema de la Figura 3.1 s'ha realitzat amb l'aplicació PSIM i representa, un motor d'inducció trifàsic alimentat amb una font de tensió trifàsica sinusoïdal. S'han ajustat els paràmetres de la font de tensió sinusoïdal trifàsica per 3300 V i 50 Hz, que són els valors nominals de la tensió d'alimentació del motor escollit.

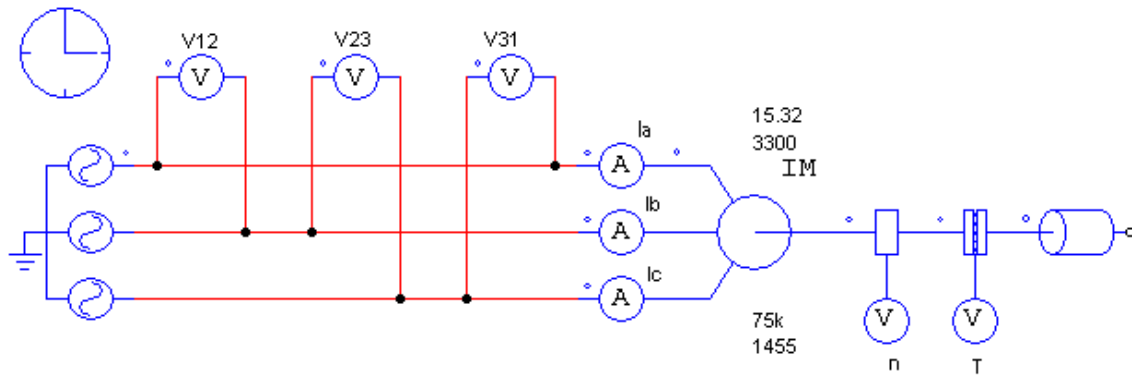


Figura 4.1 IM amb font sinusoïdal

En el sistema haurem de definir uns paràmetres de la font de tensió trifàsica sinusoïdal per aconseguir el valor eficaç de la tensió consigna. Per facilitar la configuració dels circuits trifàsics, trobem en el programa una font de tensió sinusoïdal connectada en Y de manera simètrica.

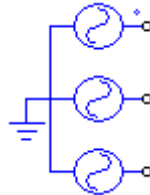


Figura 4.2 Símbol de font trifàsica sinusoïdal en PSIM

- V (line-line-rms) fa referència al valor eficaç de la tensió de línia. Com que s'ha definit que la consigna serà aconseguir un valor de tensió eficaç de 3300 V en règim permanent, s'ha introduït directament aquest valor de tensió.
- Frequency és la freqüència de la font. Serà sempre 50 Hz que és la freqüència en que treballa el motor d'inducció analitzat.
- Initial Angle (phase A). S'ha introduït un angle inicial de 0°, s'agafa com a referència la fase A.

A continuació podem veure com respon el sistema dissenyat per aquest tipus de font. Veiem com apareixen tres ones sinusoidals, una per a cada fase amb un desfasament de 120° entre elles. S'ha mostrat un interval de temps entre 1,96 s i 2 s per a que es vegi més clar, i tenint en compte que en aquest interval de temps el motor ja ha engegat i es troba en règim permanent.

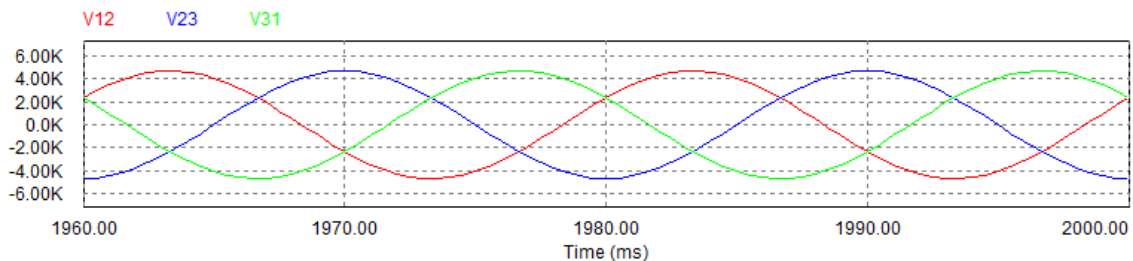


Figura 4.3 Forma d'ona sinusoidal

4.3 Esquema amb font de tensió quadrada

L'esquema de la Figura 4.4 representa un motor d'inducció trifàsic alimentat amb tres fonts monofàsiques de tensió d'ona quadrada desfasades 120° , connectades en estrella. El criteri escollit per determinar els paràmetres de la font de tensió trifàsica d'ona quadrada han estat:

- Valor eficaç de la tensió de 3300 V.
- Freqüència de la tensió: 50 Hz.

Aquest criteri permet alimentar el motor als seus valors nominals, encara que amb una forma d'ona rectangular.

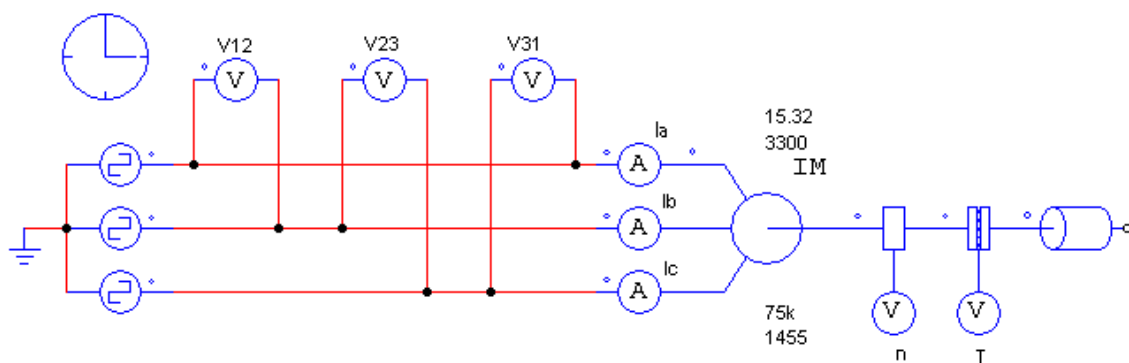


Figura 4.4 IM font d'ona quadrada

Per a l'ajustament del sistema de font de tensió d'ona quadrada, definirem els següents paràmetres:

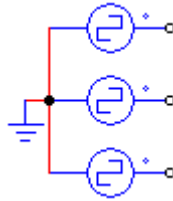


Figura 4.5 Tres fonts d'ona quadrada en PSIM

- V_{peak_peak} és el valor pic a pic de tensió. Definirem una amplitud de tensió de 4042,7 V, per obtenir el valor consigna de tensió eficaç de 3300 V.
- Frequency és la freqüència de la font. Serà sempre 50 Hz que és la freqüència en que treballa el motor d'inducció analitzat.
- Duty Cycle és la proporció del temps del semiperíode positiu, respecte el temps de duració d'un període de l'ona quadrada.
- DC Offset, regula la tensió contínua de sortida que es superposa a la senyal de variable en el temps, en aquest cas serà de 0.
- Tstart serà el temps d'inici. Abans d'aquest temps, el valor de la font serà 0.
- Phase Delay és l'angle de retard que defineix el desplaçament de fase de la forma d'ona en la posició original. Al no tractar-se d'una font quadrada trifàsica predefinida en el programa sinó que es tracta d'una connexió en Y de tres fonts quadrades individuals, haurem de marcar el desfasaments per cada una de les fases. La primera fase partirem d'un angle inicial de 0° , la segona fase un desfasament de 120° y la tercera de -120° .

Les especificacions de la font d'ona quadrada estan il·lustrades en la següent figura:

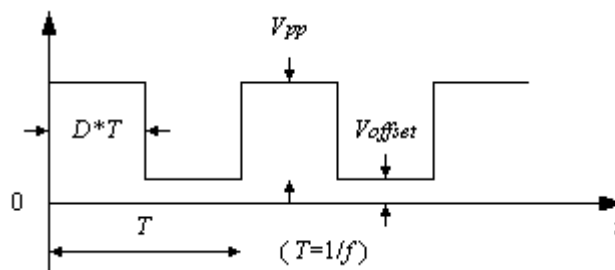


Figura 4.6 Ona quadrada

Seguidament es pot veure com respon el sistema dissenyat per aquest tipus de font. A la Figura 4.7 es pot visualitzar les tensions de línia Veiem com apareixen tres ones quadrades amb un desfasament de 120° entre elles.

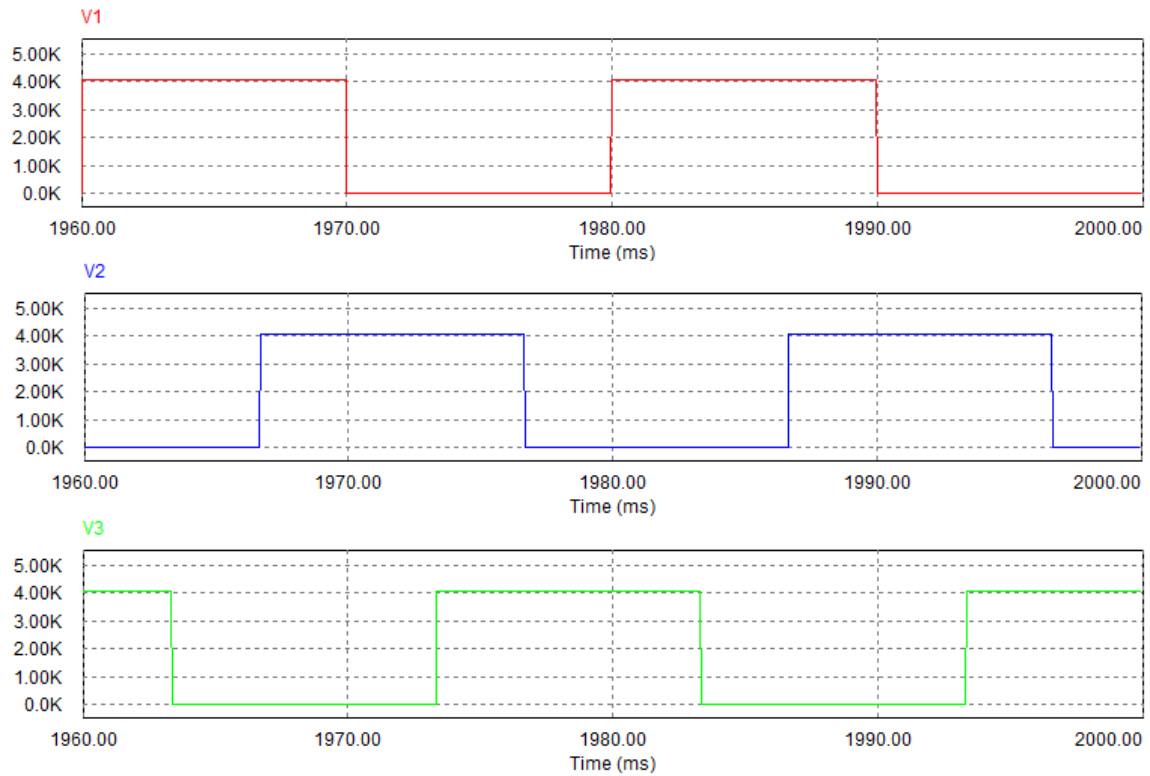


Figura 4.7 Tensions de línia de l'ona quadrada

A continuació, es poden veure les tensions de fase-neutre.

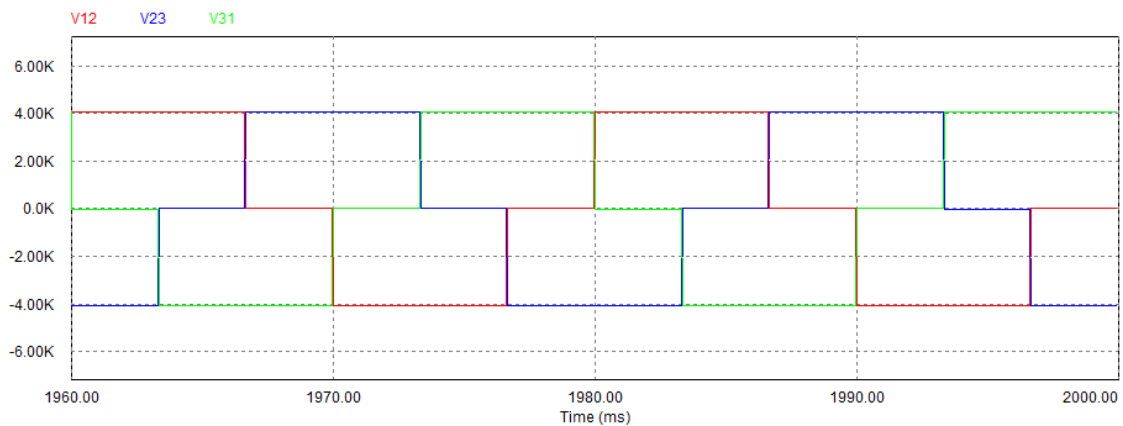


Figura 4.8 Tensions de fase de l'ona quadrada

4.4 Esquema amb font de tensió PWM

L'elecció de dissenyar un sistema de font de tensió d'ona PWM (Pulse Width Modulation) tenia com a objectiu, conèixer el comportament del motor d'inducció trifàsic alimentat mitjançant un inversor de font de tensió, amb modulació d'amplada de pols. A més de fer una comparació front l'esquema anterior, alimentat amb font de tensió d'ona quadrada i constata que amb un inversor PWM es genera un percentatge d'harmònics de corrent inferior que en ona quadrada. Per últim, comprovar que al variar la relació tensió-freqüència d'alimentació, es pot regular la velocitat del motor i inclús aconseguir una posta en marxa més progressiva.

L'esquema de la Figura 4.9 representa un motor d'inducció trifàsic alimentat mitjançant un inversor trifàsic, on el control dels interruptors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) el realitza un circuit que utilitza una tècnica PWM.

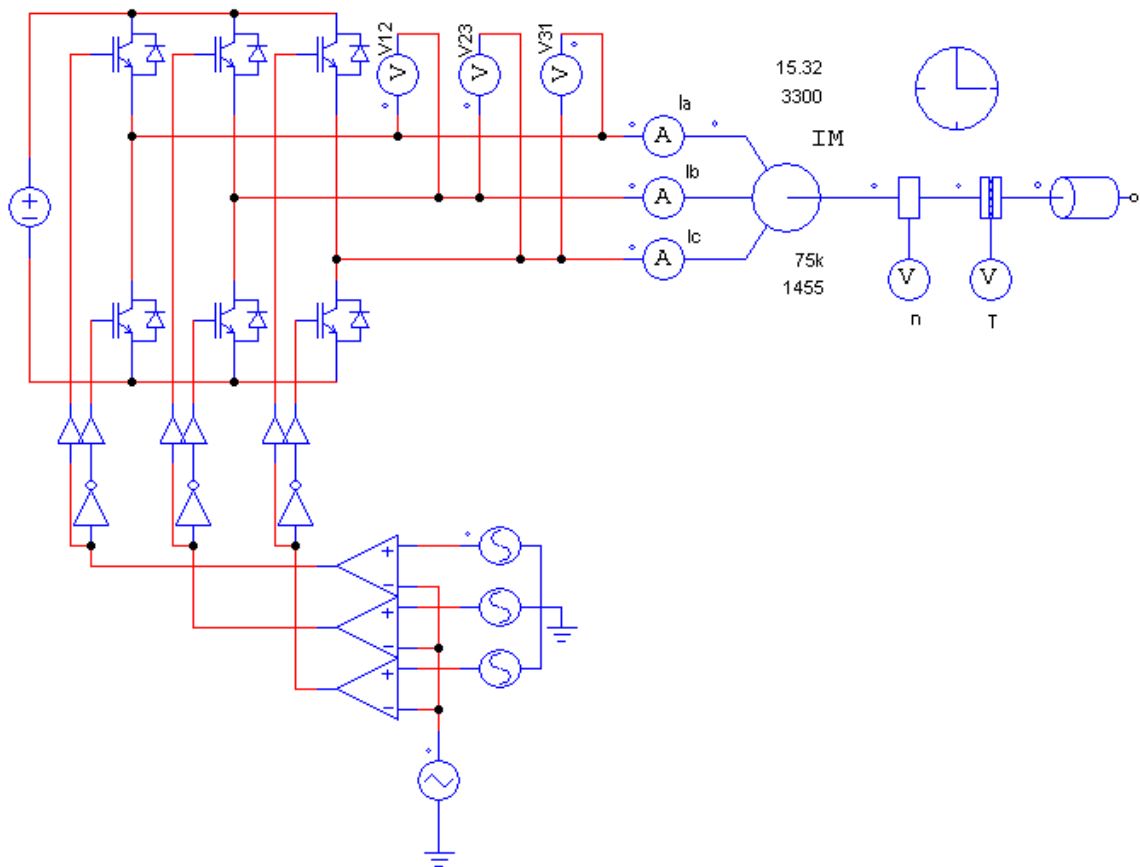


Figura 4.9 IM amb convertidor PWM

Una forma clàssica per generar una ona PWM, aplicada posteriorment al control d'un inversor que alimenta un motor d'inducció, consisteix en comparar una ona sinusoidal (ona modulant) amb una ona triangular (ona portadora).

En el moment de generar l'ona PWM s'ha tingut en compte que el nombre de polsos per cada semiperíode fos múltiple senar de 3, escollint els valors següents: $N=\{3, 9, 15, 33\}$. L'ordre dels harmònics amb amplitud més gran seran els que coincideixin amb el nombre de polsos i els seus múltiples. Per tant, quan més elevat sigui el nombre de polsos menor serà la distorsió harmònica de l'ona generada, però la freqüència de commutació dels IGBT augmentarà de forma lineal.

Per executar-ho s'ha tingut en compte la relació de l'índex freqüència (p) entre la freqüència de l'ona portadora (f_p), que és la freqüència de la font de tensió triangular, i la freqüència de l'ona modulant (f_m), que es tracta de la freqüència de la font de tensió trifàsica sinusoïdal. Està definit en la següent expressió:

$$p = \frac{f_p}{f_m} \quad (4.1)$$

A més, també s'ha ajustat l'índex de modulació, que relaciona la tensió pic a pic de l'ona modulant (sinusoïdal) amb la tensió pic a pic de l'ona portadora (triangular), que convé que tingui un valor entre 0 i 1. Complint la següent expressió:

$$M = \frac{V_m}{V_p} \quad (4.2)$$

Per el disseny del sistema mitjançant ona PWM, haurem d'ajustar tres tipus de fonts. Una serà la font trifàsica d'ona sinusoïdal (ona modulant). Aquesta font serà comú per als diferents nombres de polsos/semiperíode que es vol simular. Les altres dos fonts que s'hauran d'ajustar són la font de tensió contínua, que és la tensió d'alimentació, aquesta tensió canviarà per als diferents polsos/semiperíode i l'altra font a ajustar serà la font de tensió d'ona triangular, és a dir, la de l'ona portadora.

Podem veure en la següent imatge la font DC de tensió contínua.



Figura 4.10 Símbol de font DC en PSIM

Per aquest tipus de font l'únic paràmetre que s'haurà de modificar és l'amplitud de la tensió. S'ha ajustat de manera experimental per a cada pols/semiperíode amb la consigna d'obtenir un valor de tensió eficaç de 3300 V en règim permanent.

- Per als 3 polsos/semiperíode, s'ha introduït 5632 V.
- Per als 9 polsos/semiperíode, s'ha introduït 5146,5 V.
- Per als 15 polsos/semiperíode, s'ha introduït 5191,8 V.
- Per als 33 polsos/semiperíode, s'ha introduït 5181,8 V.

A continuació ajustarem la font trifàsica d'ona sinusoïdal.

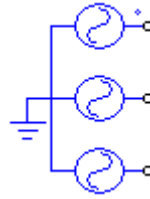


Figura 3.11 Símbol de font d'ona modulant en PSIM

- V (line-line-rms). S'ha afegit un valor de 0,9 V per que la relació amb la tensió de l'ona portadora sigui entre un valor de 0 i 1.
- Frequency. Serà sempre 50 Hz que és la freqüència en la que treballem.
- Init. Angle (phase A). S'ha introduït un angle inicial de 0°, s'agafa com a referència la fase A.

Per últim ajustarem la font de tensió d'ona triangular (ona portadora).



Figura 4.12 Símbol de font ona triangular en PSIM

- V peak_peak és el valor pic a pic de tensió. Definirem una amplitud de tensió de 2 V, per a què l'índex de modulació en relació amb la tensió elegida anteriorment per a l'ona modulant (0,9 V) no superi 1. En aquest cas si apliquem l'expressió (4.1) ens donarà un valor de 0,45. Aquest índex el que modifica és l'amplada dels polsos per semiperíode.
- Frequency és la freqüència de la font. En la freqüència s'haurà de reajustar segons els valors de polsos per semiperíode que es vulgui aconseguir. Per realitzar aquest ajustament, s'ha aplicat l'expressió (4.2).
 - Per als 3 polsos/semiperíode, resulta una freqüència de 150 Hz.
 - Per als 9 polsos/semiperíode, resulta una freqüència de 450 Hz.
 - Per als 15 polsos/semiperíode, resulta una freqüència de 750 Hz.
 - Per als 33 polsos/semiperíode, resulta una freqüència de 1650 Hz.

- Duty Cycle és la proporció del temps del semiperíode positiu, respecte el temps de duració d'un període de l'ona quadrada. S'ha agafat un cicle de treball de 0,5.
- DC Offset serà de -1 en aquest cas, per ajustar-la a la font de tensió sinusoïdal trifàsica.
- Tstart serà el temps d'inici. Abans d'aquest temps, el valor de la font serà 0. Per tant, agafarem un temps inicial de 0 segons.
- Phase Delay és l'angle de retard que defineix el desplaçament de fase de la forma d'ona en la posició original. S'ha introduït un angle de -90° per ajustar-la a la font de tensió sinusoïdal trifàsica..

Les especificacions de la font d'ona triangular estan il·lustrades en la següent figura:

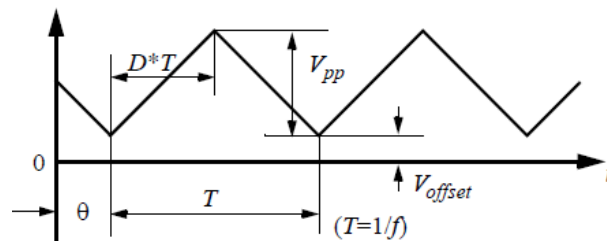


Figura 4.13 Ona triangular

A continuació mostrarem una taula resum dels paràmetres que s'han de modificar per l'obtenció dels polsos/semiperíode desitjats.

	Font DC (V)	Font Portadora (Hz)
3 polsos/semiperíode	5.632,0	150
9 polsos/semiperíode	5.146,5	450
15 polsos/semiperíode	5.191,8	750
33 polsos/semiperíode	5.181,8	1.650

Taula 4.14 Paràmetres a modificar

Un cop definits els valors, es simularà l'esquema dissenyat i mostrar per pantalla el gràfic de la tensió per a les tres fases. Així comprovar que aconseguim la tensió de consigna i els polsos desitjats. I comprovar que totes les fases tenen la mateixa forma d'ona, la mateixa amplitud, la mateixa freqüència i un desfasament de 120° entre fases.

- En la figura següent es mostra les tres tensions de fase obtingudes. Observem com s'obtenen els tres polsos/semiperíode.

Esquemes i paràmetres dels assaigs realitzats

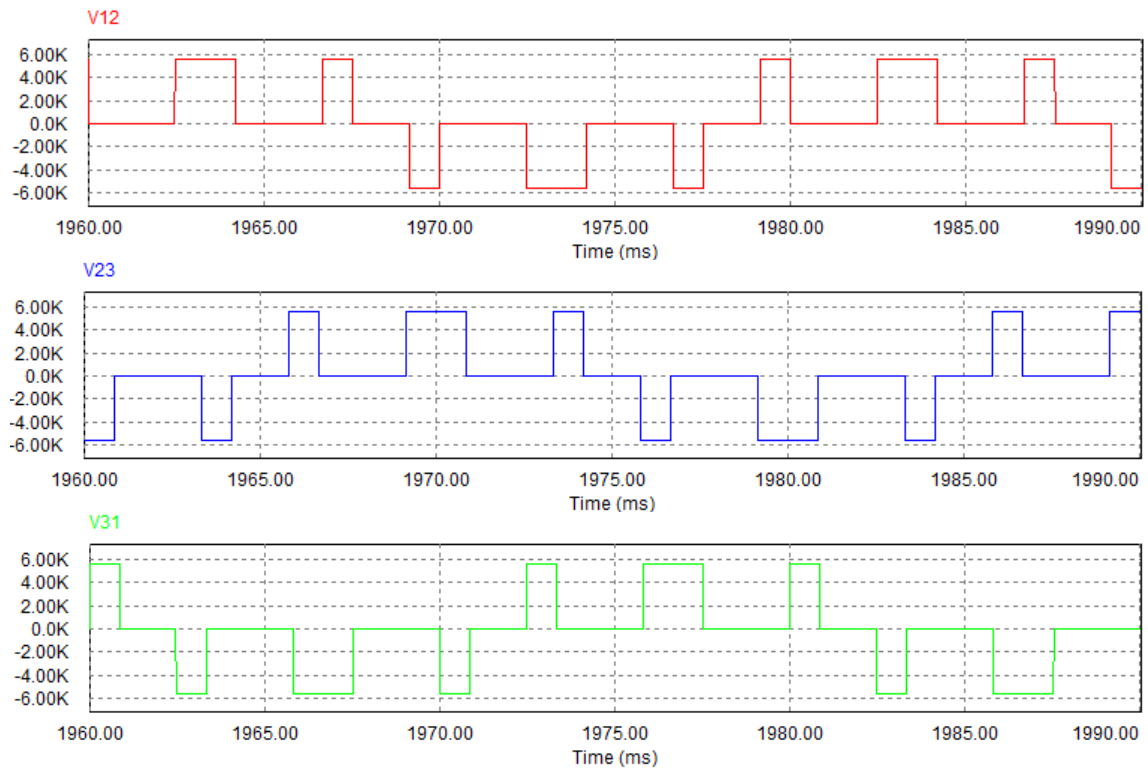


Figura 4.15 PWM 3 polsos/semiperíode

- Podem veure com en aquest cas aconseguim els 9 polsos/semiperíode desitjats.

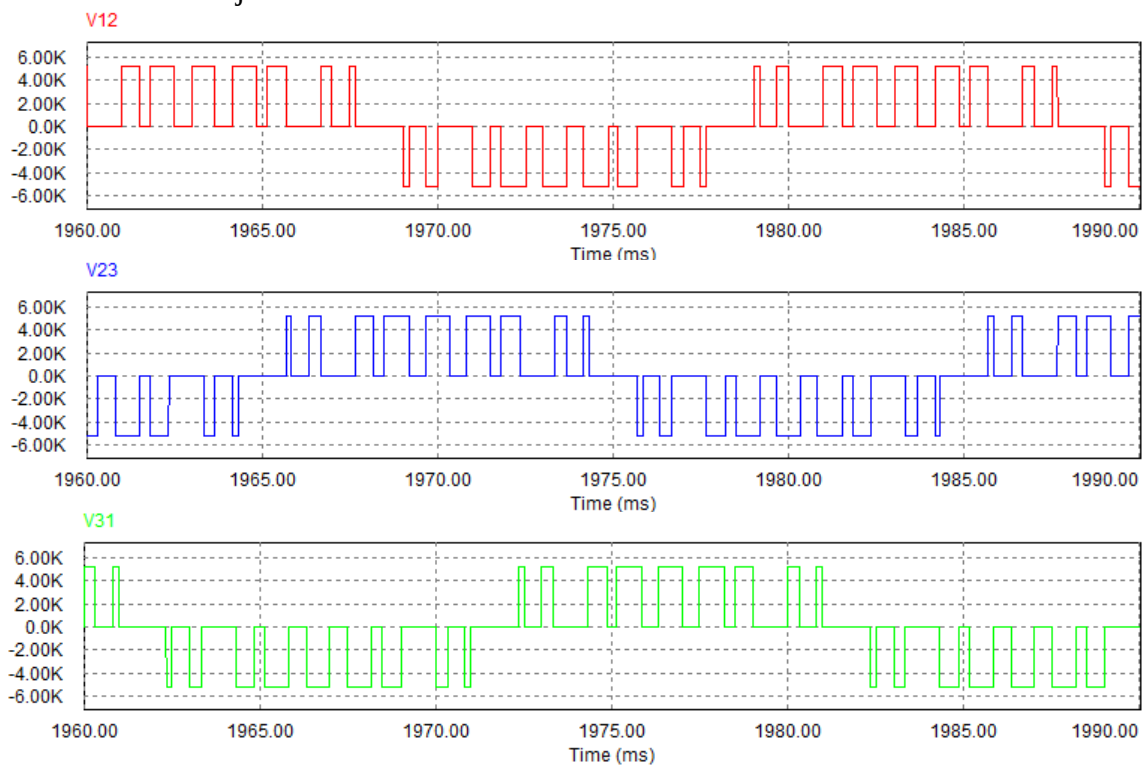


Figura 4.16 PWM 9 polsos/semiperíode

Esquemes i paràmetres dels assaigs realitzats

- En aquest cas obtenim 15 polsos/semiperíode, es mostra en la figura següent:

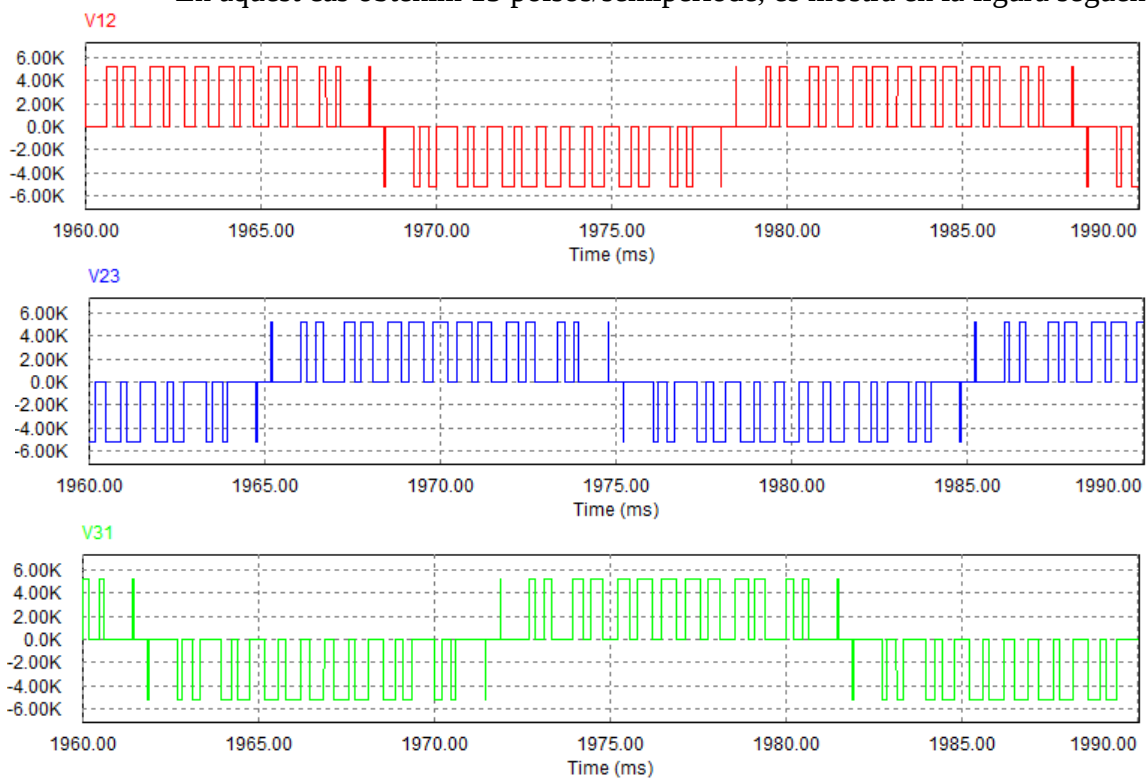


Figura 4.17 PWM 15 polsos/semiperíode

- Per últim es mostra que s'han obtingut els 33 polsos/semiperíode.

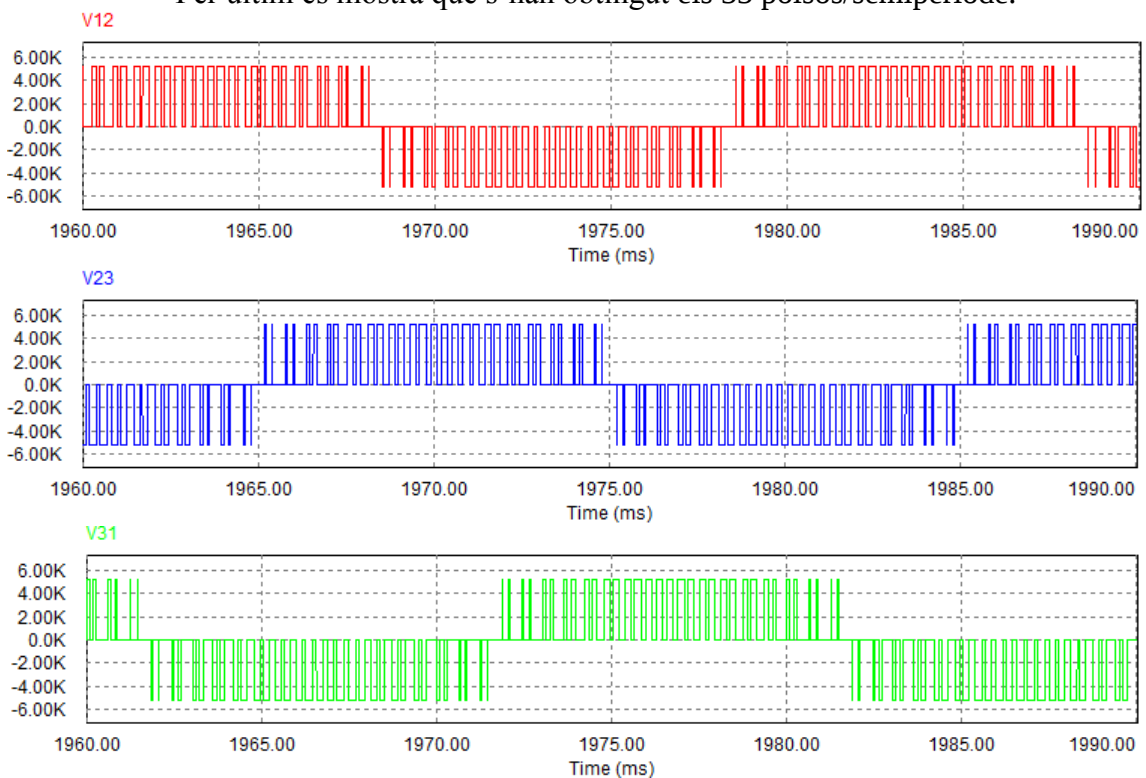


Figura 4.18 PWM 33 polsos/semiperíode

4.5 Esquemes amb font de tensió sinusoïdal amb valor eficaç i freqüència variables

L'objectiu de dissenyar un sistema on es pot regular l'amplada i la freqüència de la tensió d'entrada. Aquesta regulació comporta una engegada molt més suau que els sistemes convencionals, d'una banda i d'altre poder assignar un temps i una velocitat de sincronisme final de consigna.

A l'hora de desenvolupar l'esquema amb font de tensió sinusoïdal amb valors eficaç i freqüència variables, existeixen molts possibles criteris. En aquest treball s'han analitzat uns casos que consisteixen en donar uns valors d'entrada a una font de tensió/freqüència per trams, simulant així el funcionament d'un convertidor ideal i obtenint un ona sinusoïdal perfecta, sense distorsió i amb les tres fases a 120° .

- **Relació amplada freqüència, cas A**

El primer cas consistirà en una entrada amb relació tensió/freqüència constant i amb creixement lineal des de 0 de V i f.

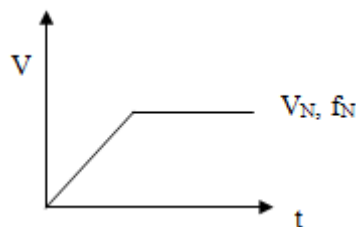


Figura 4.19 V/f cte i creixement lineal des de 0

- **Relació amplada freqüència, cas B**

El segon cas serà derivat del primer però amb la diferència que iniciem la rampa des de 0,5.

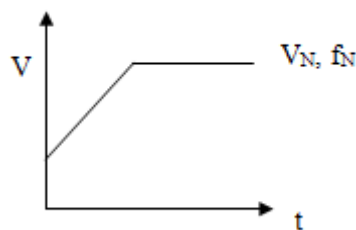


Figura 4.20 V/f cte i creixement lineal des de 0,5

- **Relació amplada freqüència, cas C**

El tercer cas consistirà en realitzar una entrada amb relació tensió i freqüència constant, amb creixement exponencial de V i f.

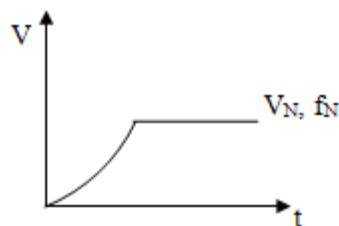


Figura 4.21 V/f cte i creixement exponencial

- **Relació amplada freqüència, cas D**

El quart cas, l'últim, consistirà en veure el comportament en el circuit quan introduïm en l'entrada un relació V/f on l'amplitud de la tensió és més gran que la freqüència.

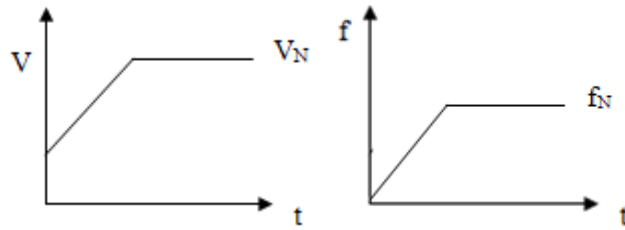


Figura 4.22 V/f on l'amplitud de V és més gran que l'amplitud de f

Si observem les figures veiem que aquestes senyals d'entrada tenen un punt en comú, estan formades per dos segments i definides per tres punts; un primer punt seria el que marca el inici, un segon punt que marca el canvi de segment i un tercer punt que indica el final. El criteri per a definir el punt de canvi del segment s'ha agafat com a referència el temps d'engegada obtingut en el circuit de font de tensió trifàsica d'ona sinusoidal. És a dir, el pendent de la rampa del senyal estarà condicionat per el temps que tarda el circuit de font trifàsica sense convertidor amb els diferents tipus de càrrega. D'aquesta manera també es podrà comparar els punts diferencials entre aquests esquemes.

4.5.1 Relació amplada freqüència, cas A

L'esquema de la Figura 4.24 representa un motor d'inducció trifàsic alimentat mitjançant un control escalar de V/f a través d'una font per trams de voltatge. Per alimentar el motor amb una senyal de creixement lineal s'han utilitzat blocs proporcionals.

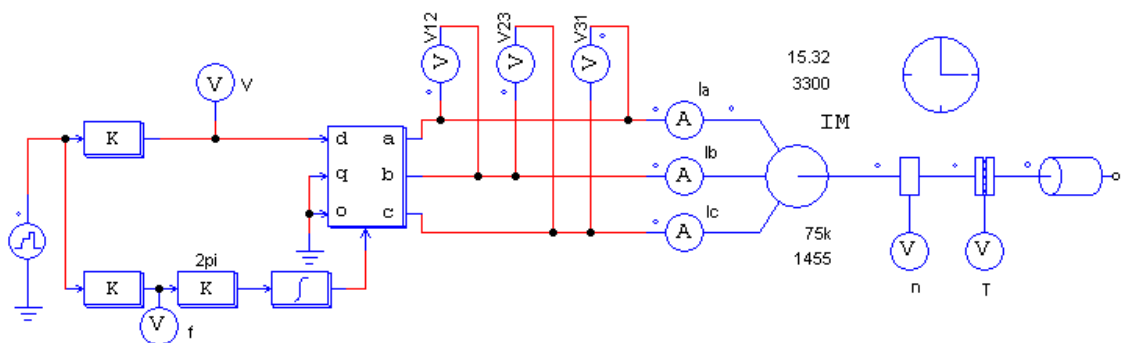


Figura 4.24 IM amb relació de V/f cte i creixement lineal

Per realitzar el circuit corresponent s'hauran d'ajustar els paràmetres de la font i dels blocs proporcionals.



Figura 4.25 Font tensió lineal per trams

- Frequency. En aquest cas la freqüència serà 0, ja que la controlem des de els valors que li donem als trams i que passen a través d'un bloc proporcional.
- No. of Points n. Els números de punts que defineixen el segment. En el nostre cas tindrà dos segments definits per 3 punts.
- Values V1..Vn. On es definirà els valors de cada punt. Hem elegit 0, 1 i 1 per tal d'obtenir la rampa del primer cas (Figura 4.19).
- Times T1..Tn, es defineix el temps de cada punt on canvia de valor, en segons. En el cas de la càrrega en buit seguirà la seqüència de 0, 0,614 i 2 s. Si es realitza l'assaig en càrrega constant la seqüència serà 0, 0,965 i 2 s. I per al cas de càrrega en parabòlic serà 0, 0,649 i 2 s. Aquestes seqüències de temps es repetiran per a la resta de casos.

En el següent element s'haurà de modificar un únic paràmetre per obtenir una senyal amb l'amplitud desitjada.

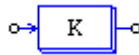


Figura 4.26 Bloc proporcional en PSIM

- Gain. En el cas de la tensió i com la consigna és arribar a 3.300 V de valor eficaç, s'ha elegit de manera experimental un guany de 2.695. Per al cas de la freqüència s'ha inserit directament un guany de 50 per obtenir una freqüència de treball de 50 Hz.

En les següents imatges es pot observar el creixement lineal de les senyals resultants de la tensió i freqüència d'alimentació iniciades des de 0. S'observa la relació constant en V/f i les diferències quan s'enrega amb càrrega en buit (color vermell), constant (color blau) i parabòlic (color verd).

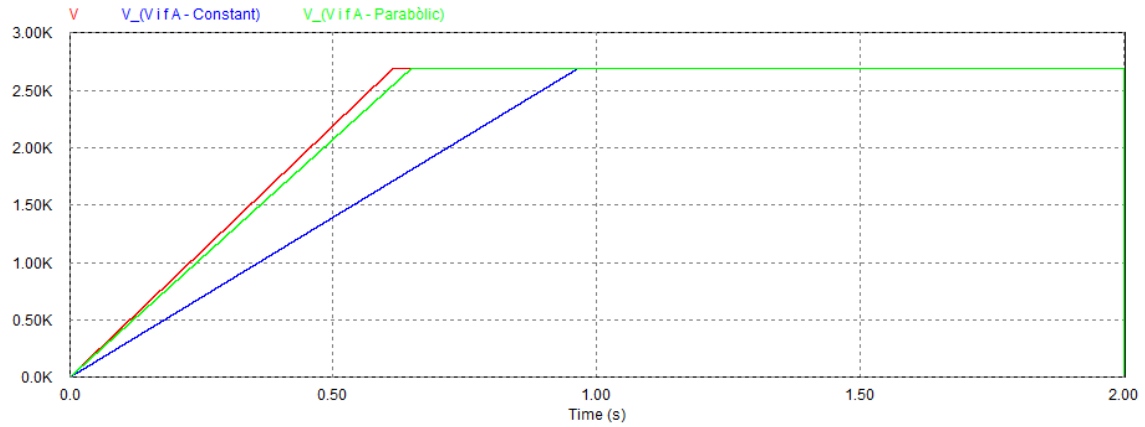


Figura 4.21 Amplitud de la tensió d'entrada

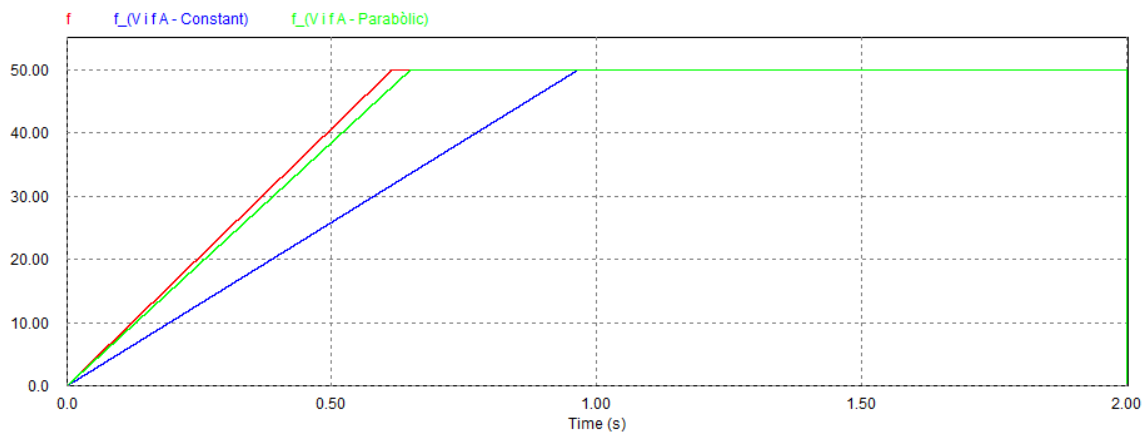


Figura 4.22 Amplitud de la freqüència d'entrada

4.5.2 Relació amplada freqüència, cas B

L'esquema de la Figura 4.29 representa un motor d'inducció trifàsic alimentat mitjançant un control escalar de V/f a través d'una font per trams de voltatge. El disseny és exactament com en el cas anterior, l'única diferència resideix en els paràmetres a modificar.

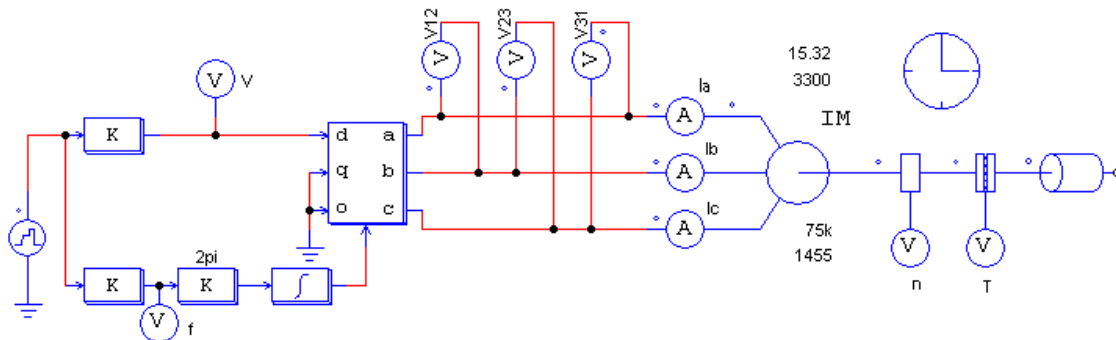


Figura 4.23 IM amb relació de V/f cte i creixement lineal

Per realitzar el circuit corresponent s'hauran d'ajustar els paràmetres dels següents elements.



Figura 3.30 Font tensió lineal per trams

- Frequency. En aquest cas la freqüència serà 0, ja que la controlem des de els valors que li donem als trams i que passen a través d'un bloc proporcional.
- No. of Points n. Els números de punts que defineixen el segment. En el nostre cas tindrà dos segments definits per 3 punts.
- Values V1..Vn. On es definirà els valors de cada punt. Hem elegit 0,5 , 1 i 1 per tal d'obtenir la rampa del primer cas (Figura 4.20).
- Times T1..Tn, és on es defineix el temps de cada punt on canvia de valor, en segons. La seqüència serà la mateixa que per al primer cas, ja explicada.

En el següent element s'haurà de modificar un únic paràmetre per obtenir una senyal amb l'amplitud desitjada.

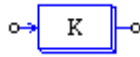


Figura 4.31 Bloc proporcional en PSIM

- Gain. En el cas de la tensió i com la consigna és arribar a 3.300 V de valor eficaç, s'ha elegit de manera experimental un guany de 2.694,6. Per al cas de la freqüència s'ha inserit directament un guany de 50 per obtenir una freqüència de treball de 50 Hz.

En les següents imatges es pot observar el creixement lineal de les senyals resultants de la tensió i freqüència d'alimentació iniciades des de 0,5. Es pot veure la relació constant en V/f i les diferències quan s'engega amb càrrega en buit, constant i parabòlic.

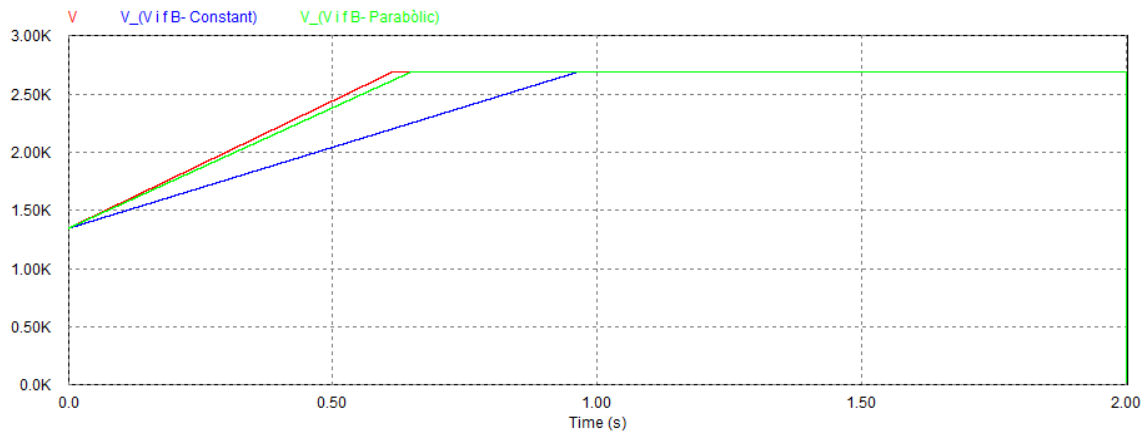


Figura 4 Amplitud de la tensió d'entrada

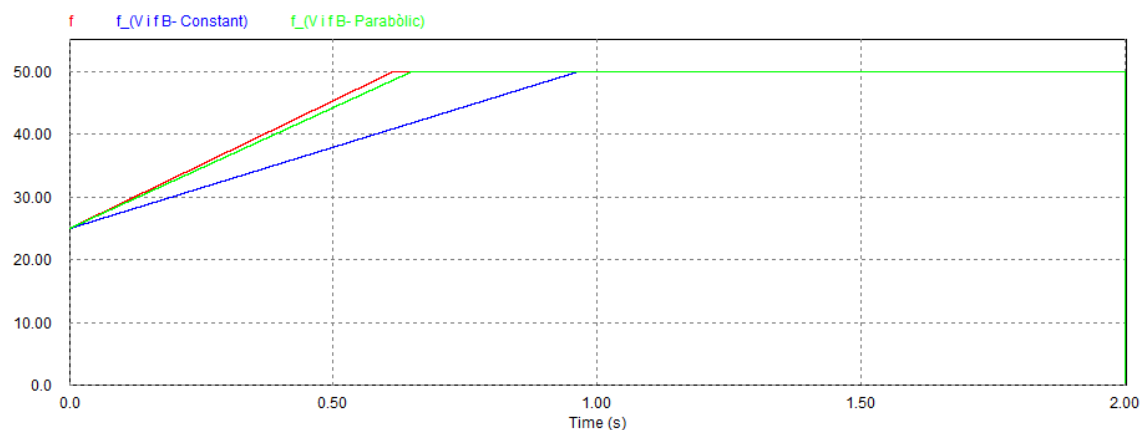


Figura 5 Amplitud de la freqüència d'entrada

4.5.3 Relació amplada freqüència, cas C

L'esquema de la Figura 4.34 representa un motor d'inducció trifàsic alimentat mitjançant un control escalar de V/f a través d'una font per trams de voltatge. Per alimentar el motor amb una senyal de creixement exponencial s'han utilitzat blocs de funció exponencials.

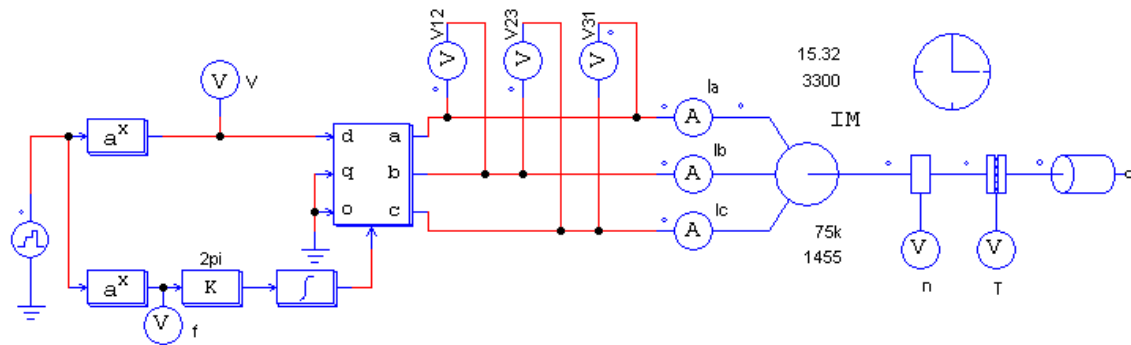


Figura 6 IM amb relació de V/f cte i creixement exponencial

Per realitzar el circuit corresponent s'hauran d'ajustar els paràmetres dels següents elements.



Figura 4.35 Font tensió lineal per trams

- Frequency. En aquest cas la freqüència serà 0, ja que la controlem des de els valors que li donem als trams i que passen a través d'un bloc proporcional.
- No. of Points n. Els números de punts que defineixen el segment. En el nostre cas tindrà dos segments definits per 3 punts.
- Values V1..Vn. On es definirà els valors de cada punt. Hem elegit 0,5, 1 i 1 per tal d'obtenir la rampa del primer cas (Figura 4.21).
- Times T1..Tn, és on es defineix el temps de cada punt on canvia de valor, en segons. La seqüència serà la mateixa que per al primer cas ja explicada.

Esquemes i paràmetres dels assaigs realitzats

En el següent element s'haurà de modificar dos paràmetres per obtenir una senyal amb l'amplitud i forma desitjada.

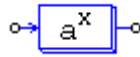


Figura 7 Bloc de funció exponencial en PSIM

La sortida d'un bloc de funció exponencial es defineix com:

$$V_o = k_1 \cdot k_2^{V_{in}} \quad (3.5)$$

on k_1 i k_2 són els coeficients, i V_{in} és la tensió d'entrada.

- Coeficient k_1 i k_2 . En el cas de la tensió i com la consigna és arribar a 3300 V de valor eficaç, s'ha elegit de manera experimental un k_1 de 1.347,5 i un k_2 de valor 2. Per al cas de la freqüència s'ha inserit un k_1 de 25 i un k_2 de 2 per tal d'obtenir un freqüència de treball de 50 Hz.

En les següents imatges es pot observar el creixement exponencial de les senyals resultants de la tensió i freqüència d'alimentació iniciades des de 0. Es pot observar la relació constant en V/f i les diferències quan s'engega amb càrrega en buit, constant i parabòlic.

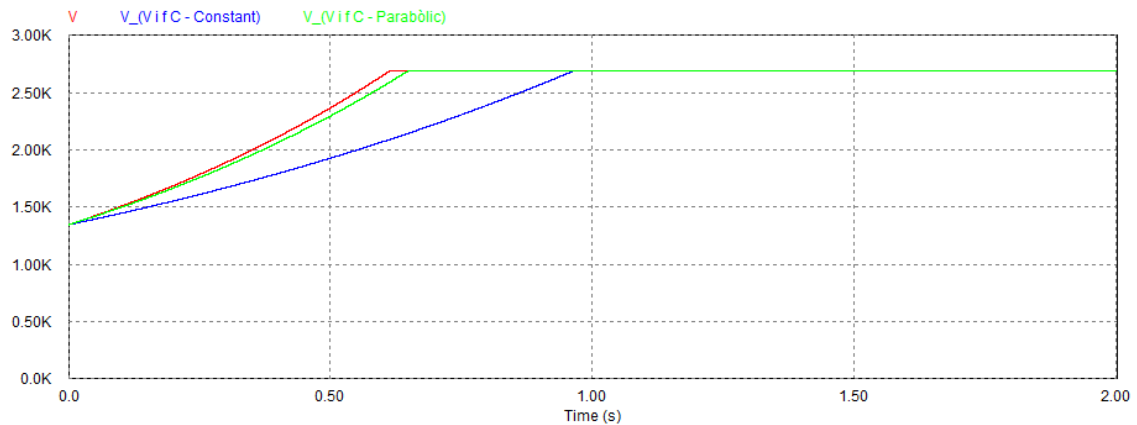


Figura 8 Amplitud de la tensió d'entrada

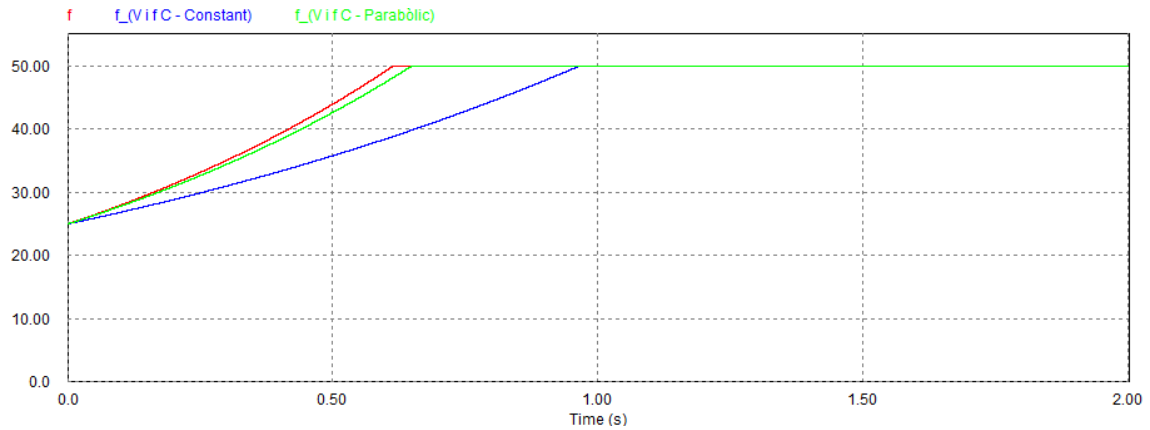


Figura 9 Amplitud de la freqüència d'entrada

4.5.4 Relació amplada freqüència, cas D

L'esquema de la Figura 4.39 representa un motor d'inducció trifàsic alimentat mitjançant un control escalar de V/f a través de font per trams de voltatge lineal. S'han utilitzat dos fonts per realitzar una relació del flux entre la V/f on la tensió té una amplitud superior.

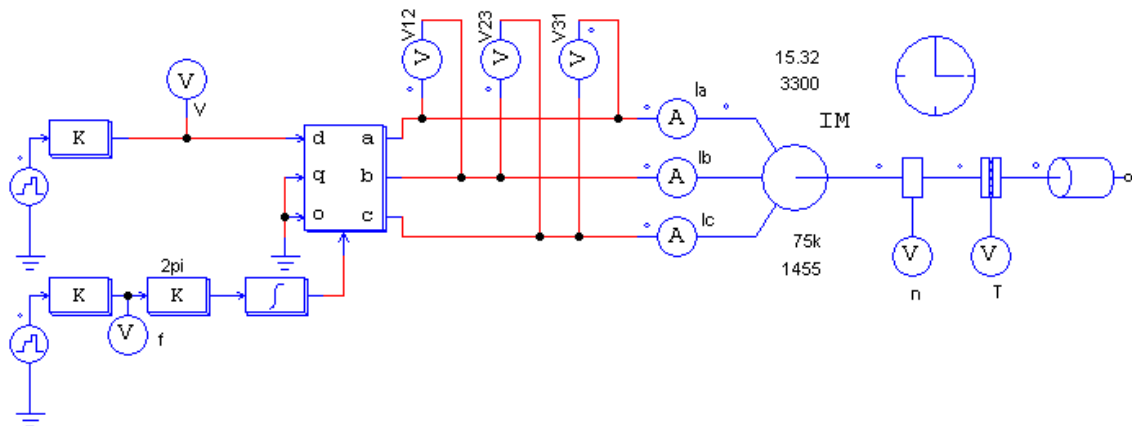


Figura 10 IM amb dos fonts variables de V i f

Per realitzar el circuit corresponent s'hauran d'ajustar els paràmetres dels següents elements.



Figura 4.40 Font tensió lineal per trams

- Frequency. En aquest cas la freqüència serà 0, en les dos fonts.
- No. of Points n. Els números de punts que defineixen el segment. En el nostre cas les dos fonts tindran dos segments definits per 3 punts.

- Values V1..Vn. On es definirà els valors de cada punt. Per a la font que modifica la tensió d'entrada s'ha elegit el valors de 0,5, 1 i 1 mentre que, per a la font que modifica la freqüència hem elegit 0, 1 i 1 per tal d'obtenir la rampa del quart cas (Figura 4.22).
- Times T1..Tn, és on es defineix el temps de cada punt on canvia de valor, en segons. La seqüència serà la mateixa que per al primer cas, ja explicada.

En el següent element s'haurà de modificar un únic paràmetre per obtenir una senyal amb l'amplitud desitjada.

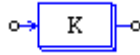


Figura 4.41 Bloc proporcional en PSIM

- Gain. En el cas de la tensió i com la consigna és arribar a 3.300 V de valor eficaç, s'ha elegit de manera experimental un guany de 2.694,5. Per al cas de la freqüència s'ha inserit directament un guany de 50 per obtenir una freqüència de treball de 50 Hz.

En les següents imatges es pot observar el creixement lineal de les senyals resultants de la tensió iniciada des de 0,5 i la senyal de creixement lineal de la freqüència d'alimentació iniciada des de 0. Es pot veure com l'amplitud de la tensió es superior a la de la freqüència i a més s'observen les diferències de quan s'enrega amb càrrega en buit, constant i parabòlic.

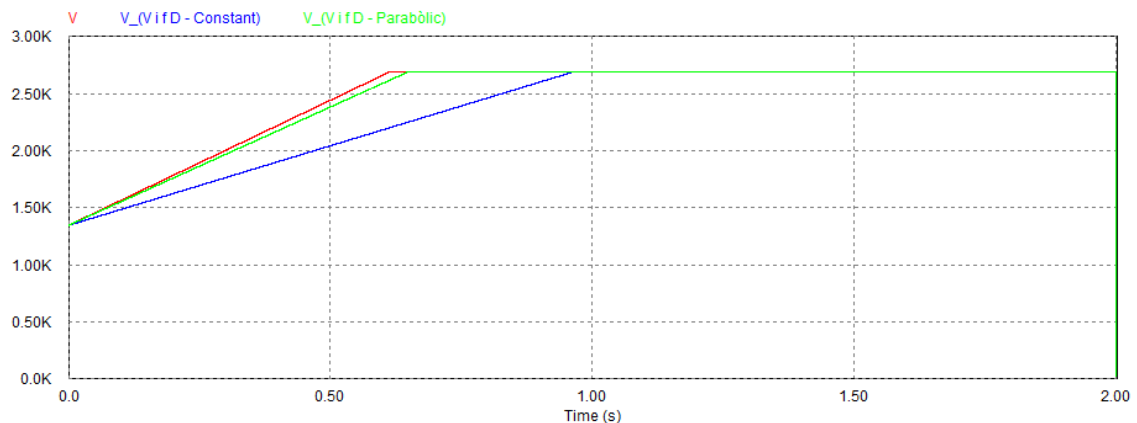


Figura 11 Amplitud de la tensió d'entrada

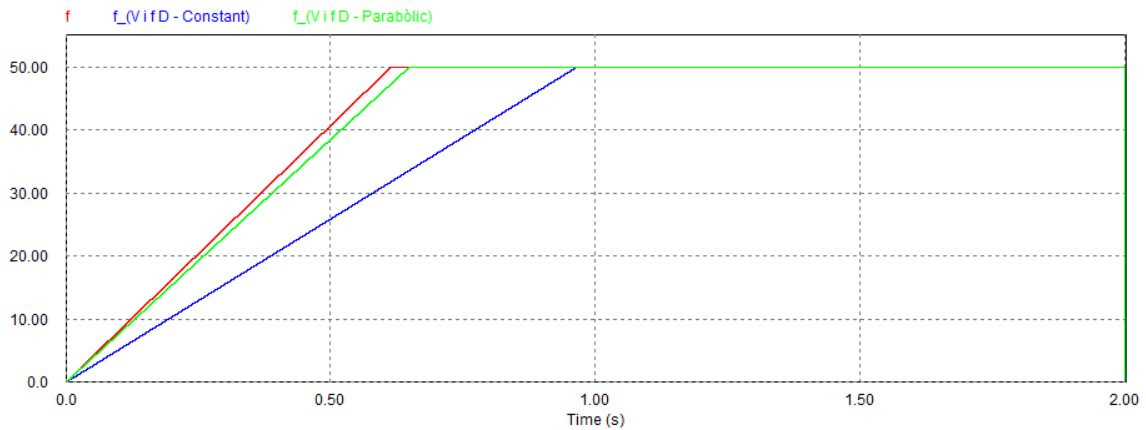


Figura 12 Amplitud de la freqüència d'entrada

Per a la realització i execució dels sistemes representats anteriorment, a més de les fonts de tensió i d'altres elements ja definits, caldrà parametritzar els elements en comú que es presenten en els següents apartats.

4.6 Paràmetres del motor

Els paràmetres que es detallen a continuació són els necessaris per la definició d'un motor de inducció de gàbia d'esquirol en PSIM. També cal aclarir que a l'hora de definir els paràmetres escollits en el programa s'ha tingut en compte que la connexió es fa en estrella, per tant, els valors dels paràmetres del circuit equivalent (Paràmetres del circuit equivalent [Taula 3.1](#)) s'hauran de modificar i quedaran de la següent manera:

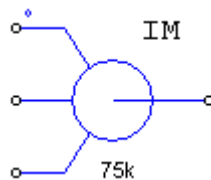


Figura 4.44 Símbol de motor d'inducció en PSIM

- Resistència del estator (R_s en Ω): 2,5066 Ω
- Inductància del estator (L_s en H): 0,0133 H
- Resistència del rotor (R_r en Ω): 1,171 Ω
- Inductància del rotor (L_r en H): 0,0133 H
- Inductància magnetitzant (L_m en H): 0,061266 H
- Número de pols: 4 pols
- Moment d'inèrcia (J en $\text{kg}\cdot\text{m}^2$): 1 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

- Torque Flag, és la bandera de sortida per al parell intern: 1; quan la bandera de parell s'estableix en 1, el parell intern generat per la màquina es guardarà en l'arxiu de sortida.
- Master/Slave Flag (1: master; 0: slave) de la màquina: 1; la unitat master defineix la direcció de referència del sistema mecànic, per tant, en un sistema mecànic, un element es designa com la unitat master (aquest element es considerar per operar en mode master), i la resta d'elements estan en mode slave.

4.7 Paràmetres de la càrrega

Els paràmetres de la càrrega que es detallen a continuació són els necessaris per ajustar els diferents tipus de càrregues. Les dades a definir en la Figura 4.45 són les següents:

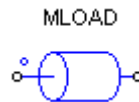


Figura 4.45 Símbol càrrega mecànica en PSIM

- Coeficients de la càrrega. Apareixen a modificar el valor de parell constant (T_c en Nm) i els coeficients del valor lineal de la càrrega (k_1), el valor quadràtic (k_2) i el cúbic (k_3) en la següent expressió:

$$T_{LOAD} = T_c + \omega \cdot k_1 + \omega^2 \cdot k_2 + \omega^3 \cdot k_3 \quad (4.3)$$

En el cas en que realitzem la simulació dels sistemes elèctrics amb càrrega en buit i parabòlic, adoptarà un valor de 0 Nm, en canvi, quan ho desenvolupem en càrrega resistent constant s'insereix un valor de 492,2 Nm.

Al realitzar l'estudi en càrrega parabòlica, degut a que la nostra càrrega és de tipus quadràtica, s'ha agafat com a criteri el parell d'engegada $T_c = 492,2$ Nm i la velocitat de $n_n = 1455$ rpm. Aplicant l'expressió (4.4), obtenim una $k_2 = 0,0212011$.

$$T = k \cdot n^2 = k_2 \cdot \left(\frac{2\pi}{60} \cdot n_n\right)^2 \rightarrow k_2 = 0,0212011 \quad (4.4)$$

- Moment d'inèrcia de la càrrega. En el aquest cas s'ha elegit un moment d'inèrcia de $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ per millorar el sistema d'accionament i superar el moment d'inèrcia (J) del motor.

A continuació s'ha realitzat una taula resum de com queda confeccionada la càrrega mecànica per als diferents parells resistents.

Parell resistent	T_c (Nm)	k_1	k_2	k_3	J (kg·m ²)
Buit	0	0	0	0	5
Constant	492,2	0	0	0	5
Parabòlic	0	0	0,0212011	0	5

Taula 4.46 Modelat de la càrrega

4.8 Paràmetres de simulació

Per definir els paràmetres de control de simulació s'han d'entendre i ajustar un sèrie d'apartats que venen a continuació:

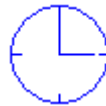


Figura 4.47 Símbol de Control de simulació en PSIM

- Time step és el número de punts de càlculs que realitza per un intervals de temps, és a dir, la freqüència de treball. Quan més petit és aquest temps més punts de càlculs realitzarà per tant, tindrem més precisió. S'ha escollit un temps de 0,5 ms per als esquemes sense convertidor i un temps de 0,2 ms en l'ona PWM ja que es necessita de més iteracions per analitzar els resultats obtinguts.
- Total time és el temps total en que transcorrerà la simulació. S'ha inserit un temps total de 2 segons, que és el temps suficient per a que el circuit hagi superat l'engegada i arribat al règim estacionari.
- Print time és el temps inicial de la representació. S'ha marcat un print time de 0 ja que es vol analitzar des de l'engegada fins al règim permanent.
- Print step són els valors recollits per el simulador que posteriorment seran representats en gràfica. S'ha marcat aquest valor a 1, això significa que tots els valors calculats es guardaran i són els que es mostraran en gràfica.
- Load Flag ens permet guardar els paràmetres previs a la simulació en un arxiu de extensió “.ssf“ si el valor és 1. No és un paràmetre rellevant que afecti a l'estudi, per tant, serà 0.

- Save Flag ens permet arxivar les dades obtingudes en un arxiu d'extensió tipus “.ssf” si el valor és 1. Tampoc serà rellevant, així que el valor serà 0.

5 Anàlisi dels resultats dels assaigs

5.1 Introducció

Una vegada realitzades les simulacions, per poder comparar i analitzar els resultats de cada simulació, s'elaboraran unes taules amb els valors resultants i transformats en valors per unitat (*pu*). L'objectiu de transformar-los en valors per unitat és per facilitar la comparació entre els resultats. Per realitzar-ho s'hauran de seleccionar uns valors base.

Com la característica mecànica obtinguda a partir dels paràmetres estimats no passa exactament pel punt de funcionament nominal, s'ha escollit com punt de referència per determinar els valors base de les diferents variables, el punt d'aquesta característica que presenta el parell nominal. A la Taula 5.1 es mostren els valors nominals de la placa de característiques, i a la Taula 5.2 es mostren els valors base escollits.

Valors nominals			
In (A)	I_{max,n} (A)	T_n (Nm)	nn (rpm)
15,32	21,67	492,2	1.455

Taula 5.1 Valors nominals

Valors base			
I_b (A)	I_{max,b} (A)	T_b (Nm)	nb (rpm)
17,27	24,42	492,2	1.489

Taula 5.2 Valors base

Un cop fixats els quatre valors base, es poden aplicar les expressions matemàtiques per passar els valors resultants a valors per unitat. Els paràmetres a transformar en valors per unitats són la intensitat màxima (5.2) i l'eficaç (5.3).

$$I_{max} = \frac{I_{max_simulació}}{I_{max,b}} [pu] \quad (5.2)$$

$$I_{rms} = \frac{I_{rms_simulació}}{I_b} [pu] \quad (5.3)$$

Els altres paràmetres a transformar són el parell màxim i el parell mig, aplicant les expressions (5.4) i (5.5).

$$T_{max} = \frac{T_{max_simulació}}{T_b} [pu] \quad (5.4)$$

$$T_{mig} = \frac{T_{mig_simulació}}{T_b} [pu] \quad (5.5)$$

I per últim, haurem de transformar la velocitat obtinguda en revolucions per minut a valor per unitat, a través de la següent relació en (5.6).

$$n = \frac{n_{\text{simulació}}}{n_b} [pu] \quad (5.6)$$

A continuació, en els següents apartats analitzarem els resultats obtinguts de les diferents simulacions a través de les taules. Aquestes taules han estat elaborades a partir dels gràfics mostrats per pantalla en la simulació. Aquests gràfics mostrats en el SIMVIEW es poden veure en els annexos.

5.2 Corrents d'engegada

Com podem observar en la Taula 5.3 a través de les dades obtingudes en les simulacions realitzades amb les diferents tipus d'ones, veiem com el pic de corrent màxim és independent del tipus de càrrega.

I Ona	CORRENT MÀXIM					
	Buit		Constant		Parabòlic	
	I max (A)	I max (pu)	I max (A)	I max (pu)	I max (A)	I max (pu)
Sinusoidal	382,2	15,6	382,2	15,6	382,2	15,6
Quadrada	364,1	14,9	364,2	14,9	364,1	14,9
PWM 3 polsos	244,7	10,0	No Engega		244,7	10,0
PWM 9 polsos	273,6	11,2	No Engega		273,6	11,2
PWM 15 polsos	273,0	11,2	No Engega		273,0	11,2
PWM 33 polsos	271,8	11,1	No Engega		271,8	11,1
Relació V/f cas A	174,2	7,1	172,8	7,1	163,4	6,7
Relació V/f cas B	275,3	11,3	268,9	11,0	274,1	11,2
Relació V/f cas C	268,8	11,0	264,9	10,8	268,2	11,0
Relació V/f cas D	561,4	23,0	540,2	22,1	554,3	22,7

Taula 5.3 Resum del pic de corrent màxim

Les conclusions que podem obtenir a partir dels resultats mostrats a la Taula 5.3 són:

- El corrent màxim és independent del tipus de càrrega quan la font de tensió és sinusoidal, quadrada o PWM.
- El corrent màxim pateix poques variacions en funció del tipus de càrrega quan la font pot regular l'amplada i freqüència de la tensió.
- El motor no engega quan la font de tensió és PWM i la càrrega presenta un parell resistent igual al nominal.
- L'engegada més suau es correspon amb la font de tensió amb relació V/f cas A, independentment del tipus de càrrega mecànica.

- L'engegada que determina el corrent màxim més elevat es correspon amb la font de tensió amb relació V/f cas D, independentment del tipus de càrrega mecànica.
- L'engegada directa del motor d'inducció (amb una font de tensió sinusoïdal trifàsica), també presenta uns valors de intensitat màxima molt elevats.

5.3 Corrents eficaços de règim permanent

En canvi, si parlem del corrent eficaç (Taula 5.4) en règim permanent, observem com amb la càrrega en buit es consumeix menys corrent respecte a la càrrega constant i parabòlica, degut a que no està sotmès a tant d'esforç com la resta.

D'altra banda, el corrent amb la càrrega constant i parabòlica haurien de ser pràcticament iguals o iguals depenent del punt d'estudi i la k_2 utilitzada. Però com la característica mecànica obtinguda a partir dels paràmetres estimats no passa exactament pel punt de funcionament nominal, trobem aquesta diferència, encara que pràcticament menyspreable (es pot veure gràficament en l'annex [7.5 Punt de funcionament nominal](#))

I Ona	CORRENT EFICAÇ EN RÈGIM PERMANENT					
	Buit		Constant		Parabòlic	
	Irms (A)	Irms (pu)	Irms (A)	Irms (pu)	Irms (A)	Irms (pu)
Sinusoïdal	9,67	0,560	17,27	1,000	17,85	1,034
Quadrada	13,76	0,797	20,36	1,179	20,83	1,206
PWM 3 polsos	31,78	1,840	No Engega		41,71	2,415
PWM 9 polsos	11,83	0,685	No Engega		24,52	1,420
PWM 15 polsos	8,91	0,516	No Engega		23,07	1,336
PWM 33 polsos	7,30	0,423	No Engega		22,54	1,305
Relació V/f	9,69	0,561	17,26	0,999	17,78	1,030

Taula 5.4 Taula resum del corrent eficaç de règim permanent

Les conclusions que podem obtenir a partir dels resultats mostrats a la Taula 5.4 són:

- El motor no engega quan la font de tensió és PWM i la càrrega presenta un parell resistent igual al nominal.
- El menor consum de corrent es correspon amb la font de tensió PWM amb 33 seguit amb 15 polsos/semiperíode en càrrega mecànica en buit, però, amb càrrega constant o parabòlica es correspon a la font quan es pot regular l'amplada i la freqüència de la tensió.
- El règim permanent que determina el corrent eficaç més elevat es correspon amb la font de tensió PWM amb 3 polsos per semiperíode independentment del tipus de càrrega mecànica.
- El corrent eficaç amb font que pot regular l'amplada i la freqüència de la tensió és independent del tipus de relació V/f, donat que en règim permanent el motor s'alimenta amb una tensió d'amplada i freqüència nominals.

- L'engegada directa del motor d'inducció amb una font de tensió sinusoïdal trifàsica, també presenta uns valors de intensitat eficaç baixos.

Veure gràfics a l'annex [8.1 Gràfiques de corrent](#).

5.4 Velocitat mecànica en règim permanent

En la Taula 5.5 podem observar com la velocitat de gir en règim permanent disminueix a mesura que es sotmet a més esforç, per això, en buit la velocitat de gir és més elevada que en càrrega constant i parabòlica. D'altra banda veiem que no hi ha pràcticament diferència entre la velocitat segons el tipus d'ona d'entrada al sistema.

n Ona	VELOCITAT MECÀNICA EN RÈGIM PERMANENT					
	Buit		Constant		Parabòlic	
	n (rpm)	n (pu)	n (rpm)	n (pu)	n (rpm)	n (pu)
Sinusoïdal	1.503	1,009	1.489	1,000	1.489	1,000
Quadrada	1.500	1,007	1.485	0,997	1.484	0,997
PWM 3 polsos	1.500	1,007	No Engega		1.452	0,975
PWM 9 polsos	1.500	1,007	No Engega		1.470	0,987
PWM 15 polsos	1.500	1,007	No Engega		1.471	0,988
PWM 33 polsos	1.500	1,007	No Engega		1.471	0,988
Relació V/f	1.500	1,007	1.486	0,998	1.486	0,998

Taula 5.5 Velocitat mecànica en règim permanent

Les conclusions que podem obtenir a partir dels resultats mostrats a la Taula 5.5 són:

- Les velocitats quan el parell resistent és nul (en buit), igualen o superen la velocitat de sincronisme. Això implicaria que la màquina funciona en règim de generador. Es tracta d'un error numèric del programa PSIM, potenciat pel fet que en el seu model matemàtic de la màquina d'inducció trifàsica no té en compte les pèrdues mecàniques.
- El motor no engega quan la font de tensió és PWM i la càrrega presenta un parell resistent igual al nominal.
- La velocitat amb font que pot regular l'amplada i la freqüència de la tensió és independent del tipus de relació V/f, donat que en règim permanent el motor s'alimenta amb una tensió d'amplada i freqüència nominals.
- El motor és més lent quan es alimentat amb font de tensió PWM amb 3 polsos/semiperíode, augmentant a mesura que augmenten el nombre de polsos. Tot i així, segueix sent més lent respecte les fonts de tensió sinusoïdal, quadrada, i regulada per amplada i freqüència.

- El motor gira més ràpid en el cas de font trifàsica sinusoïdal, per a qualsevol tipus de càrrega encara que amb poca diferència respecte la font quan es pot controlar l'amplada i la freqüència.

Veure gràfics a l'annex [8.2 Gràfiques de velocitat](#).

5.5 Temps d'engegada

El temps d'engegada s'ha calculat com el temps necessari per arribar al 98 % de la velocitat de règim permanent.

Podem veure en la Taula 5.6 que el temps d'engegada augmenta en càrrega respecte al buit degut a que el motor es troba amb càrrega mecànica.

D'altra banda veiem que el temps d'engegada s'incrementa en l'ona PWM amb convertidor front l'ona sinusoïdal (amb i sense regulació) i l'ona quadrada, degut a que ha de comparar l'ona portadora amb la modulació per determinar l'instant de commutació i per conseqüent l'amplada dels polsos resultants.

No obstant, a mesura que augmenta el nombre de polsos per semiperíode el temps d'engegada va disminuint, ja que augmenta la freqüència d'encesa i tancat de l'element semiconductor.

Si s'observa millor en els sistemes amb control escalar, com és el cas B, el motor respon més ràpid, inclús que amb una entrada directa d'ona sinusoïdal sense controlar.

t Ona	TEMPS D'ENEGADA		
	Buit	Constant	Parabòlic
	Temps (s)	Temps (s)	Temps (s)
Sinusoïdal	0,614	0,965	0,649
Quadrada	0,669	1,116	0,710
PWM 3 polsos	1,8264	No Engega	2,2516
PWM 9 polsos	1,2094	No Engega	1,3592
PWM 15 polsos	1,1904	No Engega	1,3348
PWM 33 polsos	1,1962	No Engega	1,3419
Relació V/f cas A	0,622	0,967	0,659
Relació V/f cas B	0,607	0,946	0,643
Relació V/f cas C	0,615	0,957	0,651
Relació V/f cas D	0,621	0,966	0,657

Taula 5.6 Temps d'engegada

Les conclusions que podem obtenir a partir dels resultats mostrats a la Taula 5.6 són:

- L'engegada més ràpida es produeix amb la font de tensió amb relació V/f cas B, independentment del tipus de càrrega. Això és degut a que és el tipus d'engegada

en la que el motor disposa de més flux, i per tant més parell, en el tram inicial de l'engegada.

- L'engegada és més ràpida quan el motor acciona la càrrega amb buit, seguida amb poca variació quan acciona una càrrega amb parabòlic, i sent més lent (amb més diferència) quan acciona una càrrega que presenta un parell resistent igual al nominal.
- El motor no engega quan la font de tensió és PWM i la càrrega presenta un parell resistent igual al nominal.
- L'engegada més lenta es correspon amb la font de tensió PWM, independentment dels polsos per semiperíode.

5.6 Parell màxim

Podem observar en la taula 5.7 com el parell augmenta quan s'acciona una càrrega mecànica constant. Cal destacar que en el control escalar si es realitza una relació V/f on la tensió té una relació d'amplitud superior, el parell màxim s'incrementa en gran proporció.

T Ona	PARELL MÀXIM					
	Buit		Constant		Parabòlic	
	Tmax (Nm)	Tmax (pu)	Tmax (Nm)	Tmax (pu)	Tmax (Nm)	Tmax (pu)
Sinusoïdal	3.182	6,464	3.185	6,470	3.182	6,464
Quadrada	3.347	6,799	3.351	6,808	3.347	6,799
PWM 3 polsos	1.414	2,873	No Engega		1.447	2,940
PWM 9 polsos	1.604	3,259	No Engega		1.632	3,316
PWM 15 polsos	1.609	3,269	No Engega		1.609	3,269
PWM 33 polsos	1.602	3,254	No Engega		1.602	3,254
Relació V/f cas A	1.866	3,791	1.885	3,830	1.787	3,631
Relació V/f cas B	2.660	5,403	2.739	5,564	2.658	5,400
Relació V/f cas C	2.651	5,385	2.733	5,553	2.650	5,383
Relació V/f cas D	28.062	57,013	26.239	53,310	28.367	57,632

Taula 5.7 Parell màxim

Les conclusions que podem obtenir a partir dels resultats mostrats a la Taula 5.7 són:

- El parell màxim és independent quan el motor acciona una càrrega amb buit o parabòlica, en els casos on la font de tensió és sinusoïdal trifàsica, quadrada i PWM en 15 i 33 polsos/semiperíode. En la resta de casos es produeix un petita variació.
- El motor no engega quan la font de tensió és PWM i la càrrega presenta un parell resistent igual al nominal.

- El parell màxim és major quan el motor acciona una càrrega constant, exceptuant quan correspon a la font de tensió amb relació V/f cas D.
- L'engegada amb un parell més suau es correspon amb la font de tensió PWM amb 3 polsos/semiperíode.
- L'engegada que determina el parell màxim més elevat es correspon amb la font de tensió amb relació V/f cas D, independentment del tipus de càrrega mecànica.

5.7 Parell mig en règim permanent

Si observem la Taula 5.8 es veu com el parell mig és independentment del tipus de font que alimenta el motor, exceptuant els casos on l'entrada no és una ona sinusoïdal, sinó que es produeix una distorsió.

T Ona	PARELL MIG					
	Buit		Constant		Parabòlic	
	Tmig (Nm)	Tmig (pu)	Tmig (Nm)	Tmig (pu)	Tmig (Nm)	Tmig (pu)
Sinusoïdal	0,0	0,000	492,2	1,000	515,3	1,047
Quadrada	92,2	0,187	492,2	1,000	512,3	1,041
PWM 3 polsos	394,5	0,801	No Engega		511,0	1,038
PWM 9 polsos	157,8	0,321	No Engega		502,6	1,021
PWM 15 polsos	95,4	0,194	No Engega		502,9	1,022
PWM 33 polsos	42,9	0,087	No Engega		502,9	1,022
Relació V/f	0,0	0,000	492,2	1,000	513,3	1,043

Taula 5.8 Parell mig en règim permanent

Les conclusions que podem obtenir a partir dels resultats mostrats a la Taula 5.8 són:

- El parell mig en règim permanent és pràcticament independent del tipus font, és funció del tipus i valor de la càrrega mecànica en el punt de funcionament.
- El parell mig no és independent del tipus de font, quan el motor es alimentat amb una ona quadrada o PWM, on es produeix una distorsió en l'ona.
- El motor no engega quan la font de tensió és PWM i la càrrega presenta un parell resistent igual al nominal.

Veure gràfics a l'annex [8.3 Gràfiques de parell](#).

5.8 Factor d'arissat

Un altre concepte que apareix com a resultat de la distorsió de la tensió, és l'arissat del parell.

Aquest es pot interpretar com una conseqüència del desequilibri del corrent i es pot definir com la relació entre el valor pic a pic del parell i el valor mig.

$$TRF = \frac{T_{pp}}{T_{mig}} = \frac{T_{max}-T_{min}}{T_{mig}} \quad (5.5)$$

Si s'observa el factor d'arissat en l'engeda en la Taula 5.9, veiem com durant l'engedada encara que hi ha sistemes alimentats amb ones sinusoidals, es produeix un factor d'arissat.

TRF Ona	FACTOR D'ARISSAT ENGEDADA			
	Tmax (Nm)	Tmin (Nm)	Tmig (Nm)	TRF
Sinusoidal	2735,9	975,0	1282,9	1,3726
Quadrada	2878,6	1103,7	1173,3	1,5128
PWM 3 polsos	876,2	257,7	300,8	2,0559
PWM 9 polsos	1381,7	356,9	468,5	2,1872
PWM 15 polsos	1424,0	412,1	476,8	2,1222
PWM 33 polsos	1419,1	434,6	475,0	2,0726
Relació V/f, cas A	1885,0	162,3	1237,9	1,3916
Relació V/f, cas B	2738,6	286,1	1294,5	1,8945
Relació V/f, cas C	2733,1	273,1	1285,3	1,9139
Relació V/f, cas D	26239,3	15736,6	4839,2	2,1703

Taula 5.9 Factor d'arissat durant l'engedada

Les conclusions que podem obtenir a partir dels resultats mostrats a la Taula 5.9 són:

- L'engedada que determina el factor d'arissat més elevat es correspon amb la font de tensió PWM amb 9 polsos/semiperíode.
- L'engedada que determina el factor d'arissat menor es correspon amb la font de tensió sinusoidal trifàsica.

Si observem el factor d'arissat durant el règim permanent en la Taula 5.10, veiem com en el sistema PWM a mesura que augmenta el nombre de polsos per semiperíode, el factor disminueix. També s'observa que en el règim permanent si l'ona és sinusoidal no es produeix arissat.

TRF Ona	FACTOR D'ARISSAT RÈGIM PERMANENT			
	Tmax (Nm)	Tmin (Nm)	Tmig (Nm)	TRF
Sinusoidal	492,2	492,2	492,2	0,0
Quadrada	631,4	349,3	492,2	0,5732
PWM 3 polsos	418,1	186,4	300,2	0,7720
PWM 9 polsos	577,7	366,8	467,0	0,4516
PWM 15 polsos	573,1	390,4	475,2	0,3843
PWM 33 polsos	554,9	395,0	473,4	0,3378
Relació V/f	492,2	492,2	492,2	0,0

Taula 5.10 Factor d'arissat durant el règim permanent

Les conclusions que podem obtenir a partir dels resultats mostrats a la Taula 5.10 són:

- El factor d'arissat més elevat, un cop el motor es troba funcionant en règim permanent, es correspon amb la font de tensió PWM amb 3 polsos/semiperíode.
- En règim permanent el factor d'arissat és menor quan una font de tensió PWM amb 33 polsos/semiperíode.
- Durant el règim permanent si l'ona es sinusoidal, el factor d'arissat és zero.

5.9 Harmònics

Quan un senyal elèctric (tensió o corrent) no és purament sinusoidal, pel seu anàlisi es pot fer una descomposició d'aquest senyal en un sumatori de senyals sinusoidals, una ona fonamental amb la mateixa freqüència del senyal original, més un conjunt infinit de ones sinusoidals amb freqüències múltiples de l'ona fonamental. Aquestes ones són conegudes com harmònics. Al sistema elèctric sempre s'intenta que l'ona sigui perfectament sinusoidal, és a dir, sense harmònics.

Els harmònics poden ser produïts per les càrregues no lineals que es troben en els convertidors. Els harmònics que generen efectes negatius com sobrecàrregues, sobreescalfaments, entre d'altres.

A través de les següents taules d'harmònics de tensió (Taula 5.11) i d'intensitat (Taula 5.12) es pot comprovar com mitjançant la relació d'índex de freqüència s'ha intentat eliminar els harmònics de major transcendència i que apareguin al voltant dels múltiples senars de l'ona portadora.

Si passem a analitzar cada cas veurem que:

-Per al cas de $p=3$ pols/semicicle on $f_p = p \cdot f_m = 3 \cdot 50 = 150$ Hz.

- Per a $1 \cdot f_p = 150$ Hz, veiem com al seu voltant en els punts 3-2 i de 3_{+2} apareixen els harmònics.
- Per a $2 \cdot f_p = 300$ Hz, s'observa com en 6_{-1} i en 6_{+1} tornen a aparèixer els harmònics.
- Per a $3 \cdot f_p = 450$ Hz, també podem comprovar com sorgeixen harmònics al voltant del punt 9, és a dir en 9_{-2} i 9_{+2} .

-El mateix succeeix quan $p=9$ pols/semicicle on $f_p = p \cdot f_m = 9 \cdot 50 = 450$ Hz.

- Per a $1 \cdot f_p = 450$ Hz, observem com al voltant del punt 9 (entre 9_{-2} i 9_{+2}) sorgeixen els harmònics.
- Per a $2 \cdot f_p = 900$ Hz, els harmònics més rellevants sorgeixen en 850 Hz i 950 Hz, és a dir en 18_{-1} i 18_{+1} .

-Tornem a realitzar la mateixa comprovació, però, en aquest cas quan $p=15$ pols/semicicle on $f_p = p \cdot f_m = 15 \cdot 50 = 750$ Hz.

- Per a $1 \cdot f_p = 750$ Hz, veiem com apareixen harmònics més grans en 15_{-2} i en 15_{+2} .
- Per a $2 \cdot f_p = 1500$ Hz, s'observa com en 30_{-1} i en 30_{+1} tornen a aparèixer els harmònics.

-Si observem per a $p=33$ pols/semicicle on $f_p = p \cdot f_m = 33 \cdot 50 = 1650$ Hz. Veiem que:

- Per a $1 \cdot f_p = 1650$ Hz, els harmònics sorgeixen en 33_{-2} i 33_{+2} .
- Per a $2 \cdot f_p = 3300$ Hz, els harmònics sorgeixen en 66_{-1} i 66_{+1} .
- Per a $3 \cdot f_p = 4950$ Hz, els harmònics sorgeixen en 99_{-2} i 99_{+2} .

Anàlisi dels resultats dels assaigs

Posició	Freqüència	Quadrada	PWM 3 polsos	PWM 9 polsos	PWM 15 polsos	PWM 33 polsos
1	50 Hz	4464	2641	3273	3303	3296
3	150 Hz	13	0			
5	250 Hz	884	3066			
7	350 Hz	643	294	846		
9	450 Hz	13	0			
11	550 Hz	398	1288	847		
13	650 Hz	349	1221	64	853	
17	850 Hz			1525	851	
19	950 Hz			1523		
25	1250 Hz			880		
29	1450 Hz				1534	
31	1550 Hz				1541	851
35	1750 Hz					848
43	2150 Hz				887	
47	2350 Hz				888	
65	3250 Hz					1516
67	3350 Hz					1537
97	4850 Hz					878
101	5050 Hz					862

Taula 5.11 Harmònics de tensió

Posició	Freqüència	Quadrada	PWM 3 polsos	PWM 9 polsos	PWM 15 polsos	PWM 33 polsos
1	50 Hz	24,98	168,49	208,73	210,56	210,16
3	150 Hz	0,11	0,00			
5	250 Hz	12,42	42,63			
7	350 Hz	6,31	2,89	8,56		
9	450 Hz	0,03	0,00			
11	550 Hz	2,60	8,21	5,51		
13	650 Hz	1,82	6,56	0,49	4,74	
17	850 Hz			6,39	3,65	
19	950 Hz			5,44		
25	1250 Hz			2,60		
29	1450 Hz				3,84	
31	1550 Hz				3,31	2,09
35	1750 Hz					1,86
43	2150 Hz				1,60	
47	2350 Hz				1,47	
65	3250 Hz					1,78
67	3350 Hz					1,44
97	4850 Hz					0,80
101	5050 Hz					0,77

Taula 5.12 Harmònics d'intensitat

S'ha pogut comprovar que amb un alt índex de freqüència es permet obtindre un gran nombre de polsos per semiperíode de la ona fonamental, ubicant als harmònics no desitjats en freqüències altes, assegurant-se que la seva presència no afecti considerablement al comportament del motor.

Així doncs, a mesura que augmenten els polsos/semiperíodes l'amplitud dels harmònics d'intensitat disminueix.

Veure gràfics a l'annex [8.4 Gràfiques d'harmònics d'intensitat i de tensió](#).

5.9.1 Distorsió Harmònica de intensitat i tensió

Per interpretar la deformació de la senyal sinusoïdal causada per harmònics en forma numèrica, s'utilitza l'expressió THD, que es aplicada per a la senyal de tensió i de corrent. El THD_v i el THD_i s'utilitza per definir l'efecte dels harmònics en la senyal de corrent i tensió del sistema elèctric de potència. La distorsió harmònica s'expressa com la relació de l'arrel de la suma dels quadrats dels harmònics, respecte a la fonamental. Ve definit per les següents expressions:

$$THD_v = \frac{\sqrt{(v_{1fp}^2 + v_{2fp}^2 + v_{3fp}^2 + \dots)}}{v_{fonamental}} \quad THD_i = \frac{\sqrt{(i_{1fp}^2 + i_{2fp}^2 + i_{3fp}^2 + \dots)}}{i_{fonamental}} \quad (5.6)$$

Observem en la Taula 5.13 com a mesura que augmenten el nombre de polsos la distorsió harmònica de intensitat va disminuint. Es produeixen menys harmònics perquè a mesura que hi ha més polsos la forma d'ona s'assembla més a la ona sinusoïdal.

Com a conseqüència es forma una ona de tensió més distorsionada, augmentant així la seva distorsió harmònica.

D'altra banda podem veure com amb un sistema de tensió d'ona PWM la distorsió harmònica és inferior que amb un sistema de font de tensió d'ona quadrada.

THD Ona	DISTORSIÓ HARMÒNICA	
	THD _v	THD _i
Quadrada	0,2722	0,5719
PWM 3 polsos	1,346	0,2612
PWM 9 polsos	0,7999	0,0645
PWM 15 polsos	0,8430	0,0387
PWM 33 polsos	0,8373	0,0180

Taula 5.13 Distorsió harmònica

Les conclusions que podem obtenir a partir dels resultats mostrats a la Taula 5.13 són:

Anàlisi dels resultats dels assaigs

- L'engegada que determina una distorsió harmònica d'intensitat més elevada es correspon amb la font de tensió d'ona quadrada.
- L'engegada que determina una distorsió harmònica de tensió més elevada es correspon amb la font PWM amb 3 polsos/semiperíode.
- L'engegada que determina una distorsió harmònica de corrent menor es correspon amb la font de tensió PWM amb 33 polsos/semiperíode.
- L'engegada que determina una distorsió harmònica de tensió menor es correspon amb la font de tensió d'ona quadrada.

6 Conclusions

El mètode d'engegada que presenta el millor comportament del motor d'inducció és el que correspon a una font de tensió sinusoïdal amb valor eficaç i freqüència variables, amb relació V/f constant i creixement lineal, cas A. Aquest sistema presenta el menor consum del corrent d'engegada i un baix parell d'engegada, el qual indica que l'engegada és més progressiva. Amb aquesta relació de V/f s'aconsegueix disminuir de forma considerable les corrents d'engegada, allargant la vida útil del motor. Respecte a la velocitat per establir-se al règim permanent és un sistema força ràpid. Aquestes característiques fan que aquest motor amb aquest sistema sigui presumiblement idoni per accionaments en que es requereix d'un elevat número d'engegades i parades.

El sistema a descartar, correspon al sistema amb relació V/F , cas D. L'elevada intensitat i parell consumits en l'engegada fa descartar directament aquest sistema, ja que, possiblement actuarien les proteccions per evitar la posta en marxa, inclús es podria arribar a la fatiga i/o trencament dels elements mecànics del motor.

En canvi el sistema que presenta un pitjor comportament en aquest motor amb els paràmetres escollits, és el sistema amb font PWM, ja que, amb càrrega constant no arriba a aconseguir el suficient parell sol·licitat per realitzar l'engegada, a més de la distorsió que es produeix. Si s'aconseguís engegar el motor quan la càrrega es constant i minimitzar la distorsió, el sistema amb font PWM amb 33 polsos/semiperíode, també seria un accionament interessant. S'ha de tenir en compte que en aquest treball les fonts de tensió PWM utilitzades presenten una consigna de V/f constant, i de amb valors iguals als nominals.

7 Referències

- [1] A. Jaramillo-Matta, L. Guasch-Pesquer, L. Martinez-Salamero and J.A. Barrado-Rodrigo, "Operating points estimation of three-phase induction machines using a torque-speed tracking technique", *IET Electric Power Applications*, vol. 5, pp. 307-316, 2011.
- [2] M. Akbaba, M. Taleb, A. Rumeli (1995) "Improved estimation of induction machine" en *IEEE*, vol.34, pp. 65-73.
- [3] L. Guasch-Pesquer, L. Youb, F. González-Molina, E.R. Zeppa-Durigutti, "Effects of voltage unbalance on torque and current of induction motors" *IEEE*, pp. 341-352, 2012.
- [4] B. Biswas, S. Das, P. Purkait, M. S. Mandal and D.Mitra, "Current Harmonics Analysis of Inverter-Fed Induction Motor Drive System under Fault Conditions" *IEEE*, vol. 2, pp. 1430-1434, 2009.
- [5] Jay R. Patel, S.R. Vyas, "Simulation and Analysis of Constant V/F Induction Motor Drive", *ISSN: 2321-0869, Volume-2, Issue-4, April 2014*.
- [6] Alfonso Álzate, Duberney Murillo Yarce, Marcela González Valencia, "Speed Control Using Voltage-Frequency Relation", *ISSN 0122-1701, diciembre 2011*.
- [7] Máquinas Eléctricas. Jesús Fraile Mora. McGraw Hill. 6ª edición.
- [8] A. Jaramillo-Matta and L. Guasch-Pesquer, "Estimacion de parametros para la máquina de induccion a partir de datos de catalogo y aspectos constructivos," in *XXIX Jornadas de Automatica*, Tarragona, Spain., 2008.
- [9] PSIM User's Manual, *Powersim Technologies Inc, version 9.0, March 2010*.

8 Annexes

8.1 Gràfiques de corrent

8.1.1 Càrrega mecànica en buit

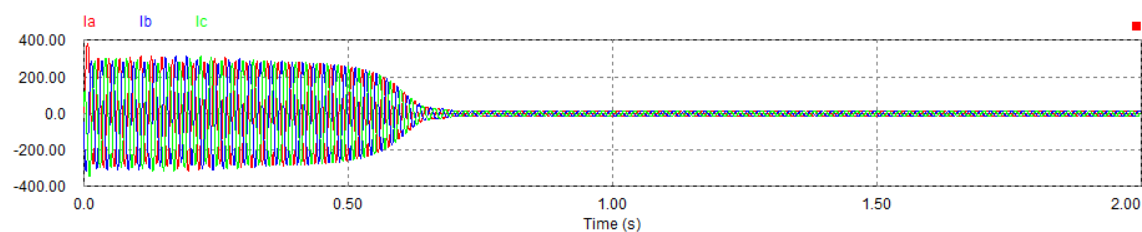


Figura 8.1 Gràfica de corrent amb font trifàsica d'ona sinusoidal

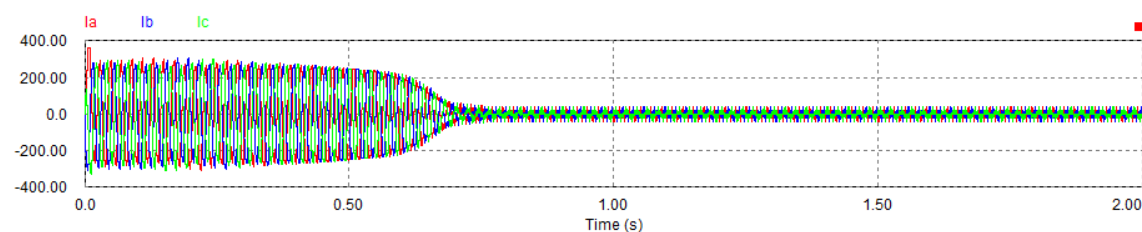


Figura 13 Gràfica de corrent amb font de tensió d'ona quadrada

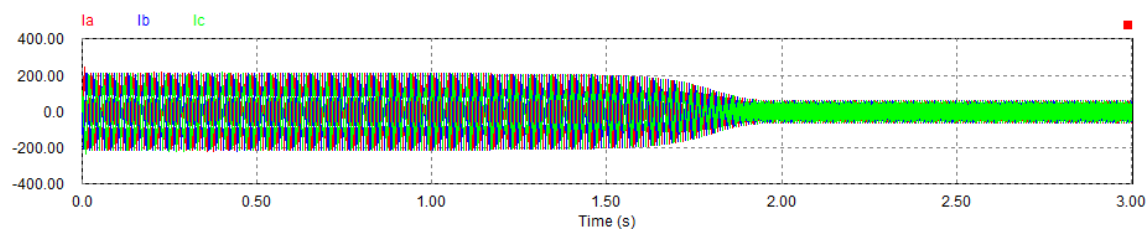


Figura 14 Gràfica de corrent amb ona PWM de 3 pols/semiperíode

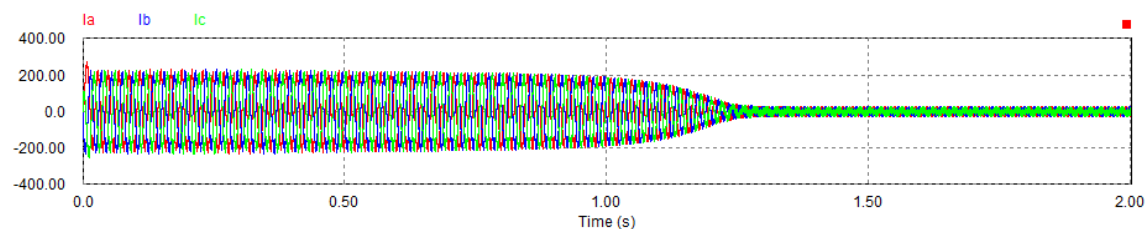


Figura 8.4 Gràfica de corrent amb ona PWM de 9 pols/semiperíode

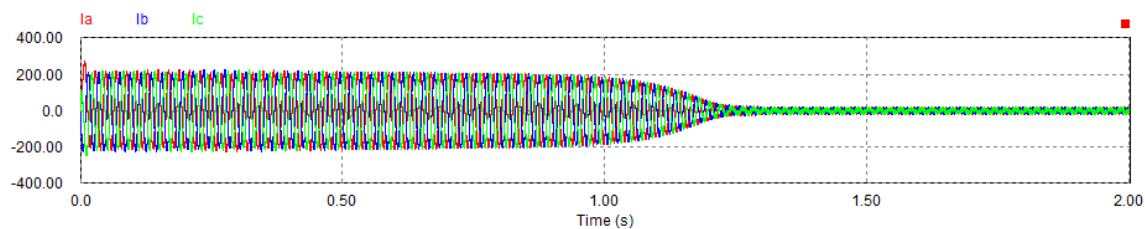


Figura 8.5 Gràfica de corrent amb ona PWM de 15 pols/semiperíode

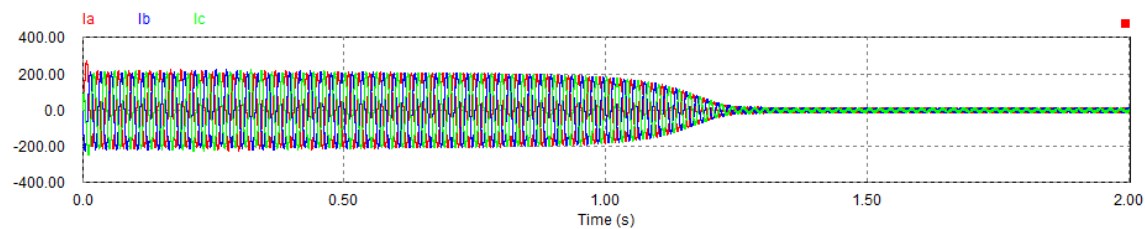


Figura 8.6 Gràfica de corrent amb ona PWM de 33 pols/semiperíode

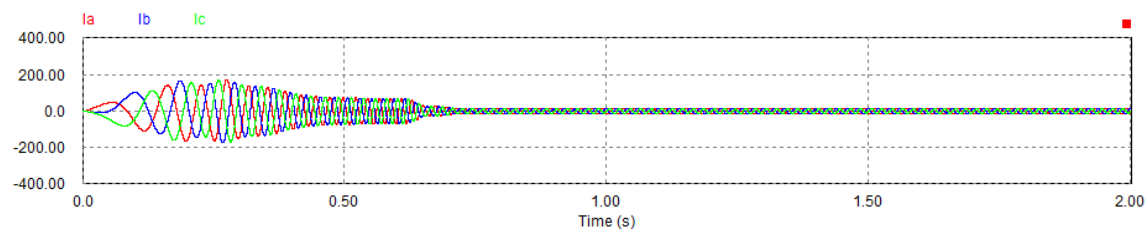


Figura 8.7 Gràfica de corrent amb V/f constant i creixement lineal des de 0

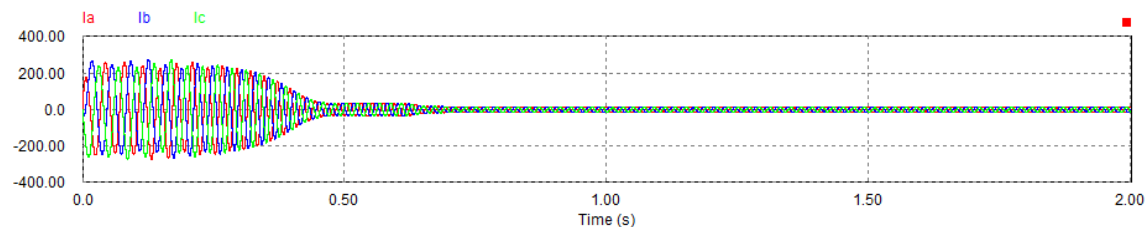


Figura 8.8 Gràfica de corrent amb V/f constant i creixement lineal des de 0,5

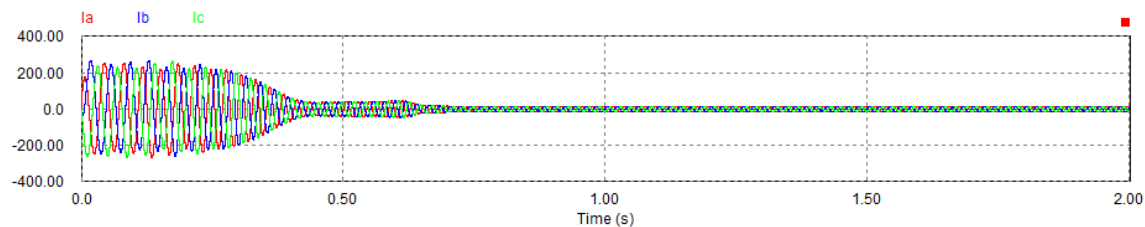


Figura 8.9 Gràfica de corrent amb V/f constant i creixement exponencial

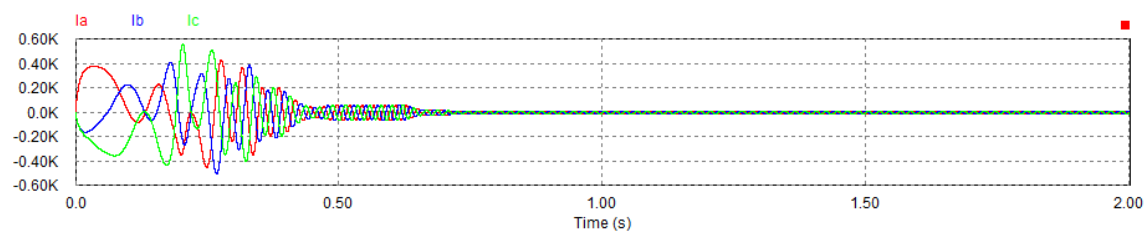


Figura 8.10 Gràfica de corrent amb amplitud de V més gran que f

8.1.2 Càrrega mecànica constant

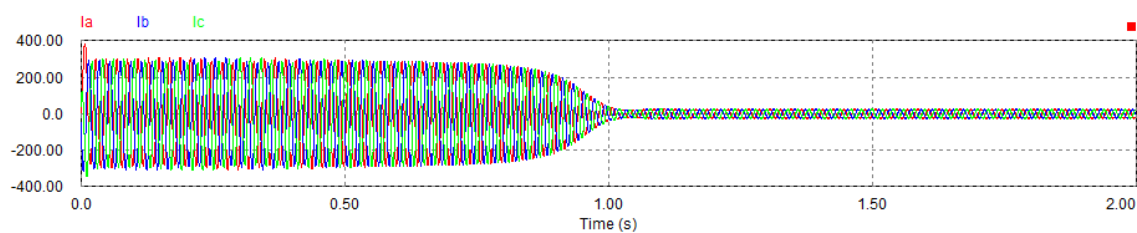


Figura 8.11 Gràfica de corrent amb font trifàsica d'ona sinusoïdal

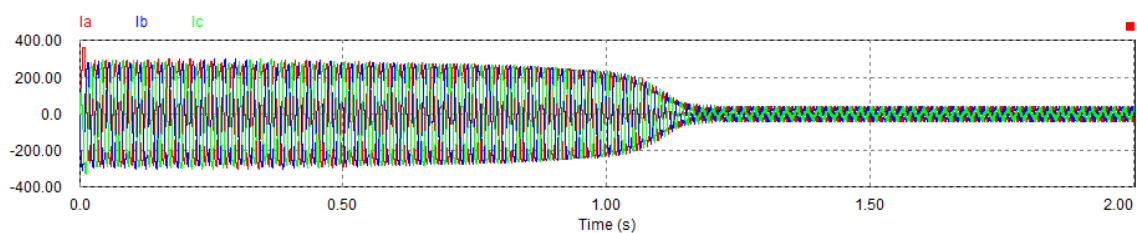


Figura 8.12 Gràfica de corrent amb font de tensió d'ona quadrada

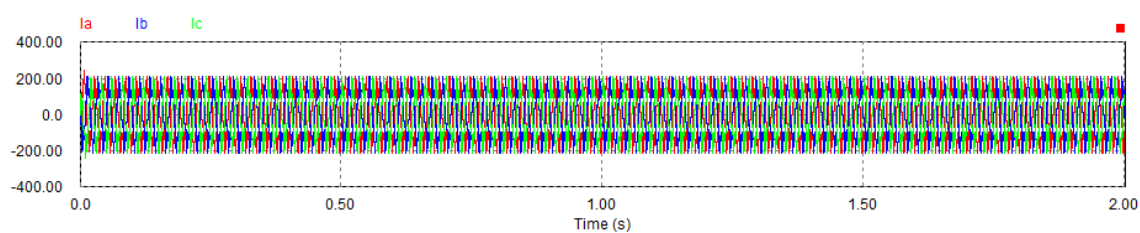


Figura 8.13 Gràfica de corrent amb ona PWM de 3 pols/semiperíode

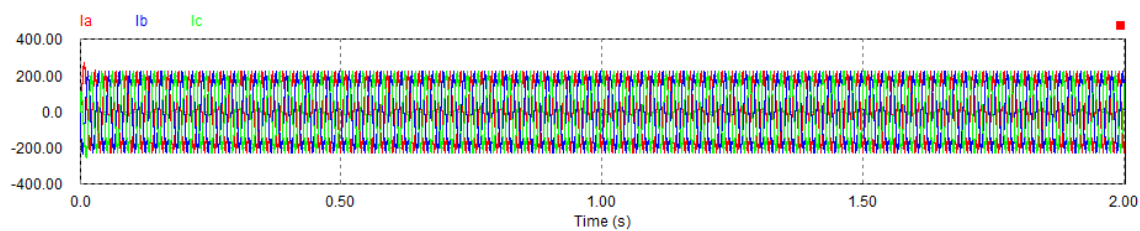


Figura 8.14 Gràfica de corrent amb ona PWM de 9 pols/semiperíode

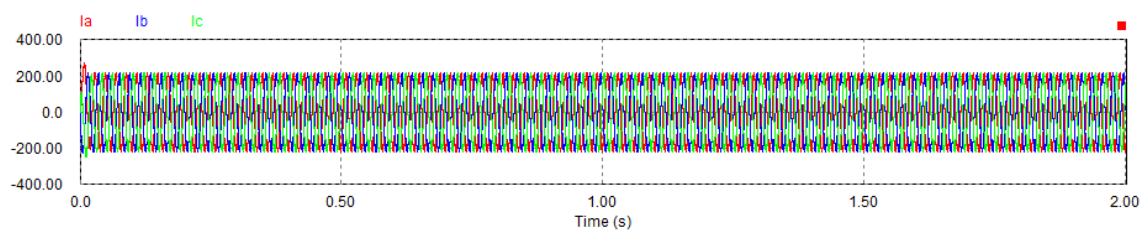


Figura 15 Gràfica de corrent amb ona PWM de 15 pols/semiperíode

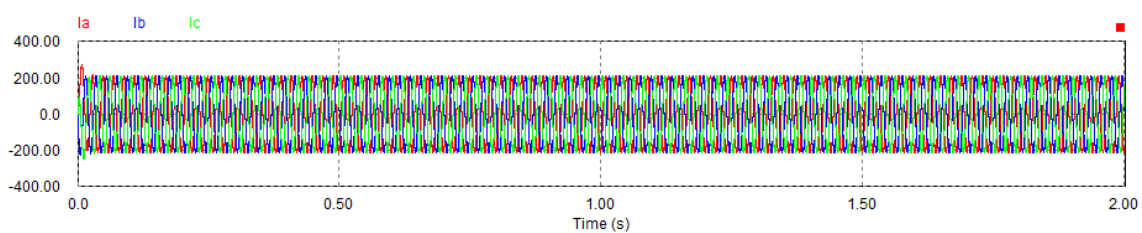


Figura 8.16 Gràfica de corrent amb ona PWM de 33 pols/semiperíode

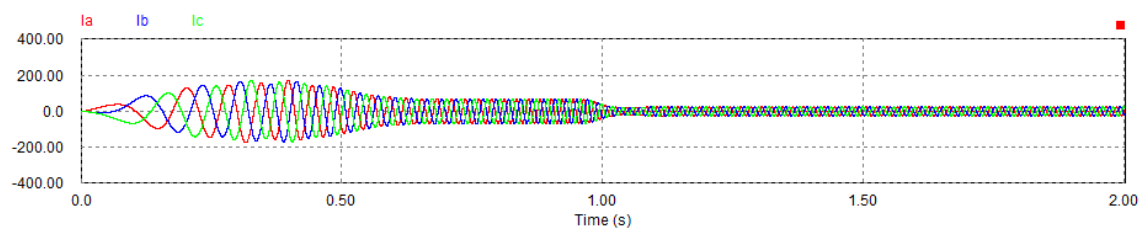


Figura 8.37 Gràfica de corrent amb V/f constant i creixement lineal des de 0

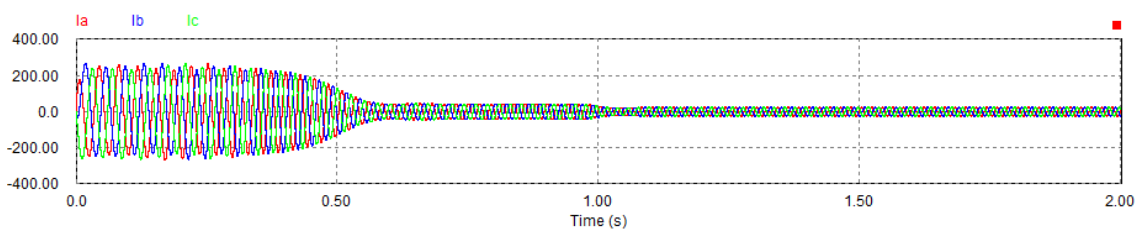


Figura 8.38 Gràfica de corrent amb V/f constant i creixement lineal des de 0,5

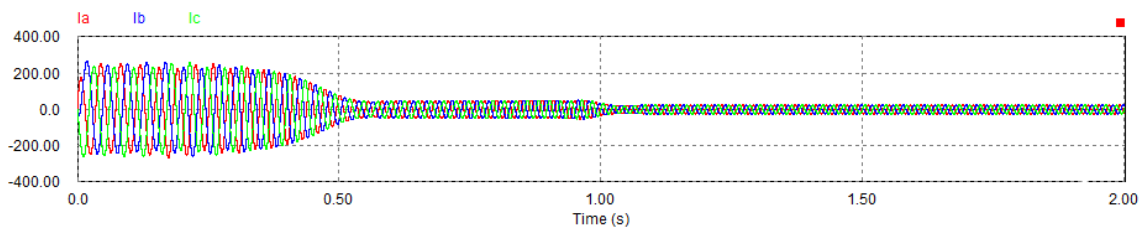


Figura 8.39 Gràfica de corrent amb V/f constant i creixement exponencial

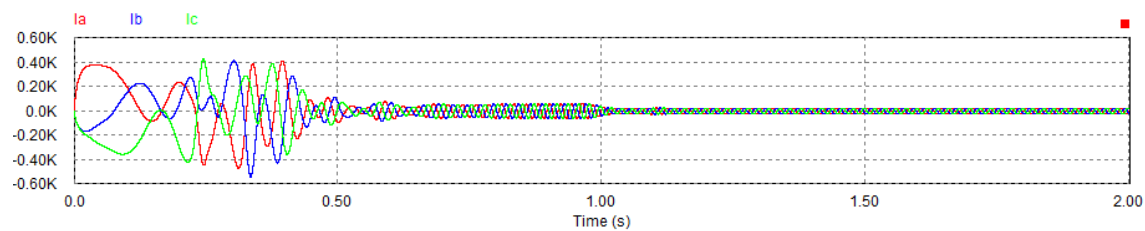


Figura 8.40 Gràfica de corrent amb amplitud de V més gran que f

8.1.3 Càrrega mecànica parabòlica

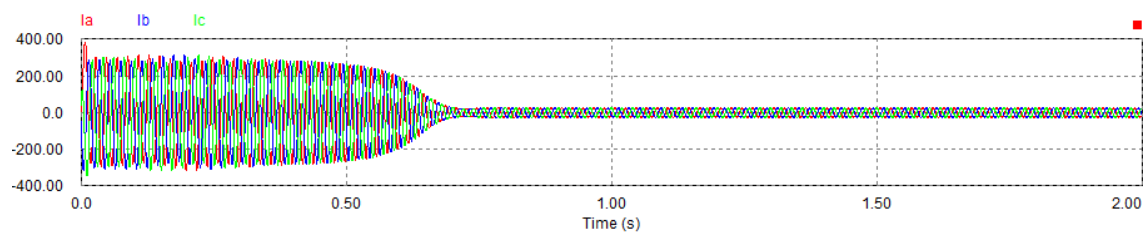


Figura 8.21 Gràfica de corrent amb font trifàsica d'ona sinusoïdal

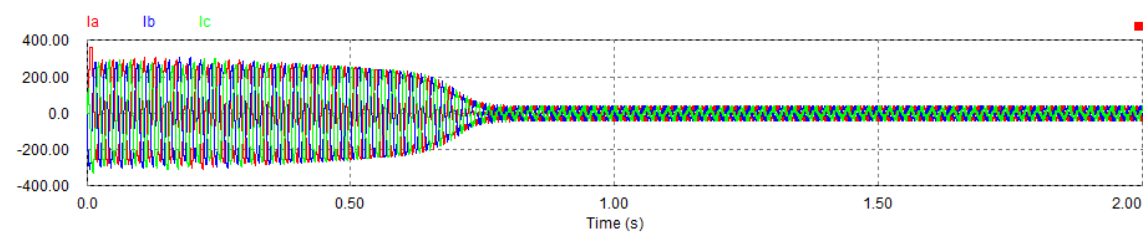


Figura 8.22 Gràfica de corrent amb font de tensió d'ona quadrada

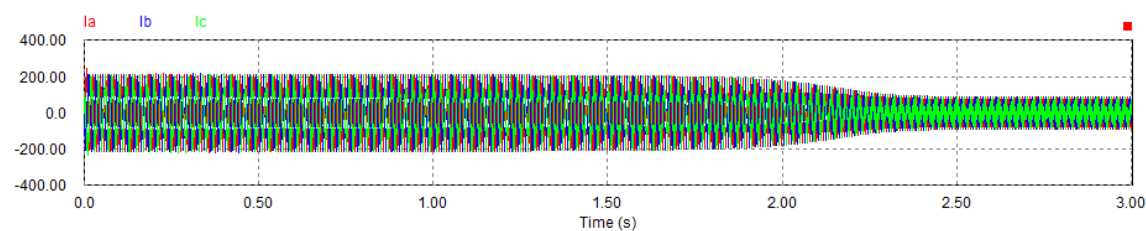


Figura 8.23 Gràfica de corrent amb ona PWM de 3 pols/semiperíode

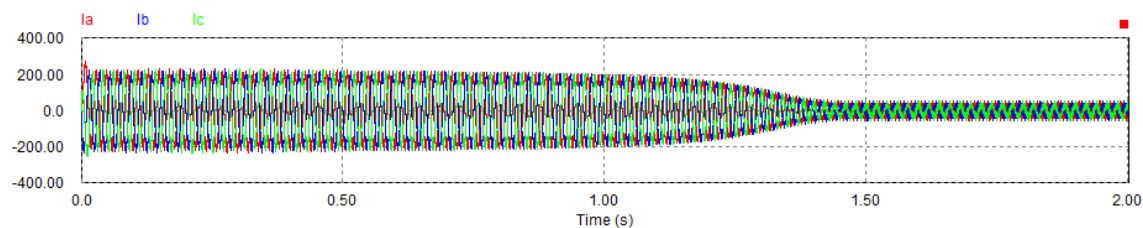


Figura 8.24 Gràfica de corrent amb ona PWM de 9 pols/semiperíode

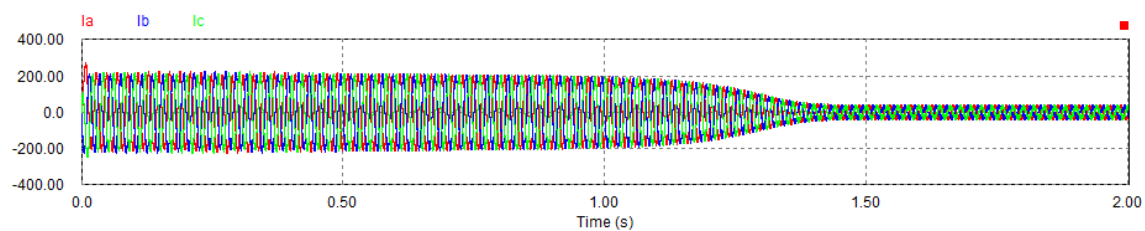


Figura 8.25 Gràfica de corrent amb ona PWM de 15 pols/semiperíode

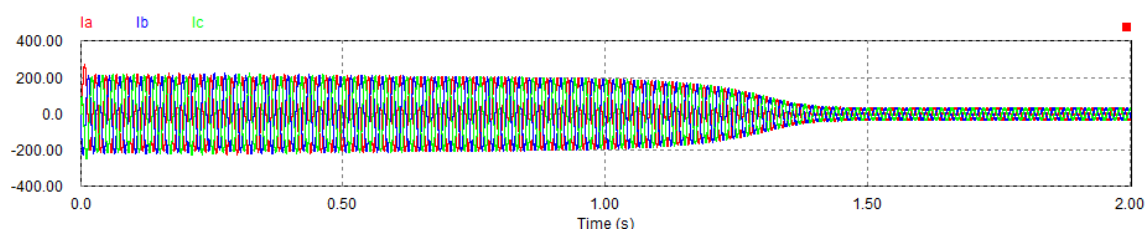


Figura 8.26 Gràfica de corrent amb ona PWM de 33 pols/semiperíode

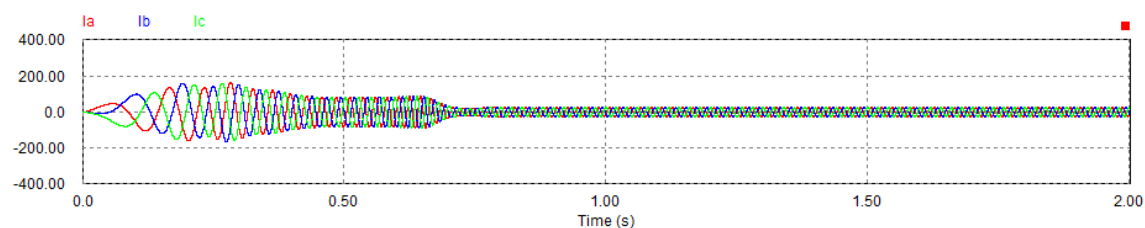


Figura 8.37 Gràfica de corrent amb V/f constant i creixement lineal des de 0

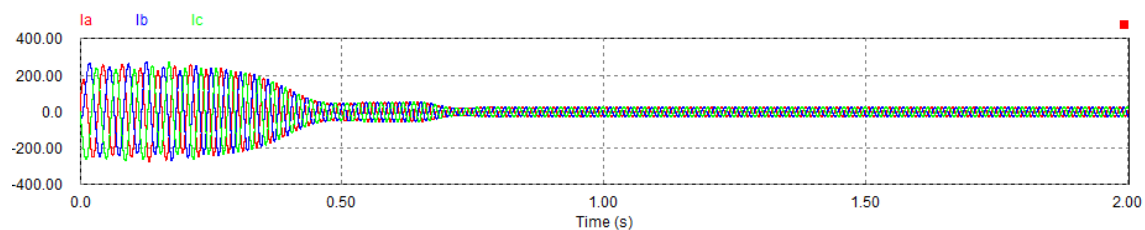


Figura 8.38 Gràfica de corrent amb V/f constant i creixement lineal des de 0,5

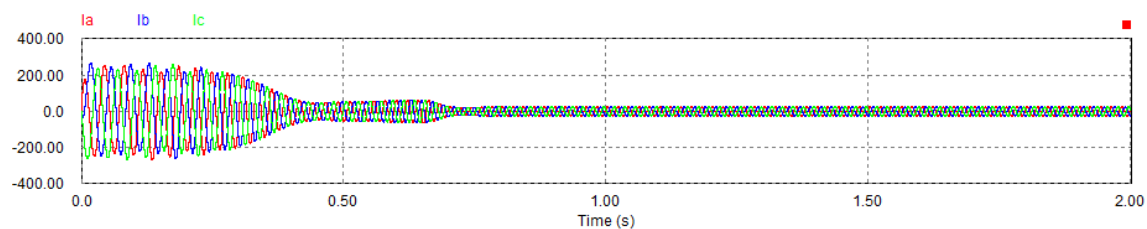


Figura 8.39 Gràfica de corrent amb V/f constant i creixement exponencial

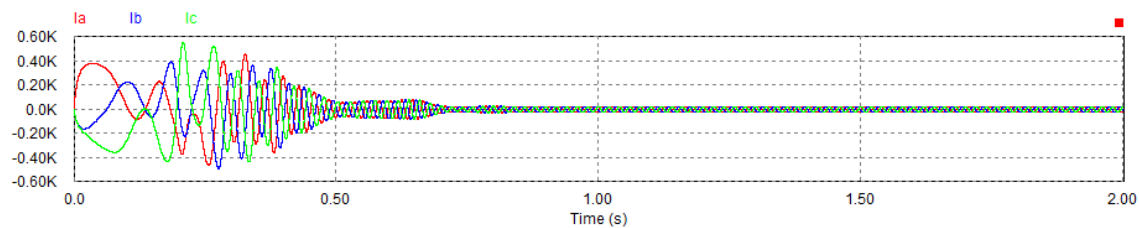


Figura 8.40 Gràfica de corrent amb amplitud de V més gran que f

8.2 Gràfiques de velocitat

8.2.1 Càrrega mecànica en buit

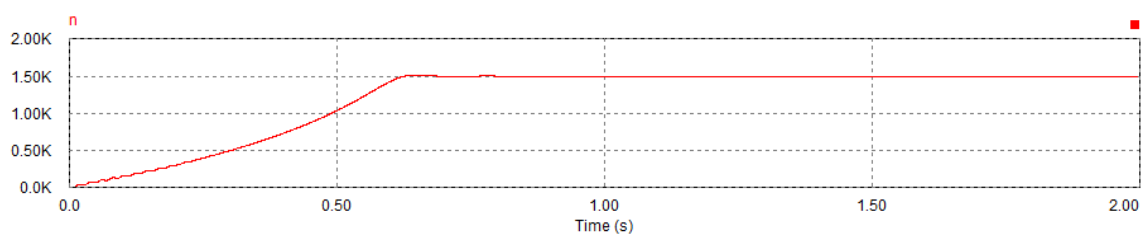


Figura 8.31 Gràfica de velocitat amb font trifàsica d'ona sinusoidal

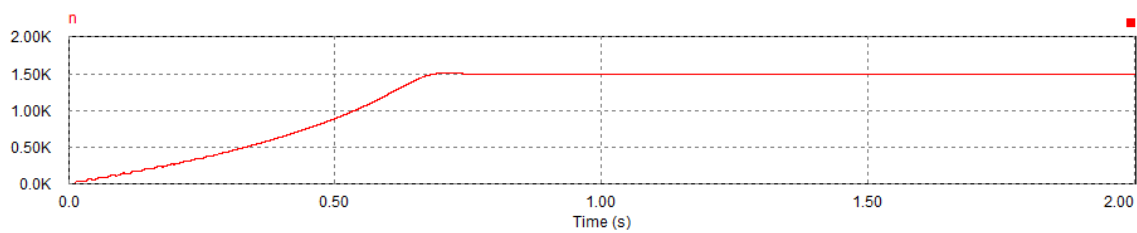


Figura 8.32 Gràfica de velocitat amb font de tensió d'ona quadrada

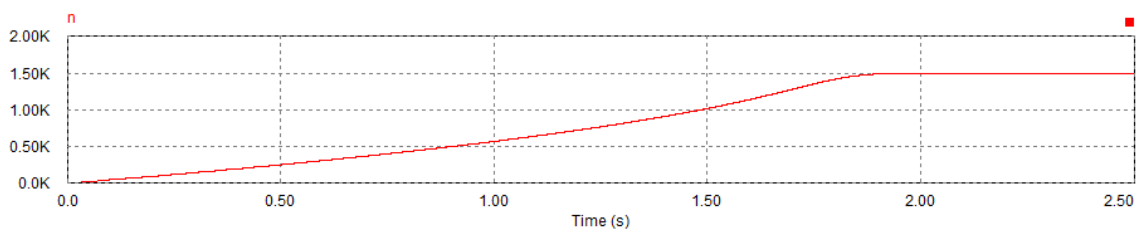


Figura 8.33 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 3 pols/semiperíode

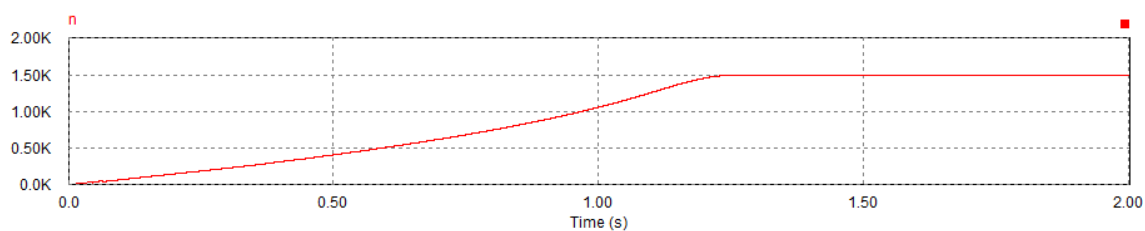


Figura 8.34 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 9 pols/semiperíode

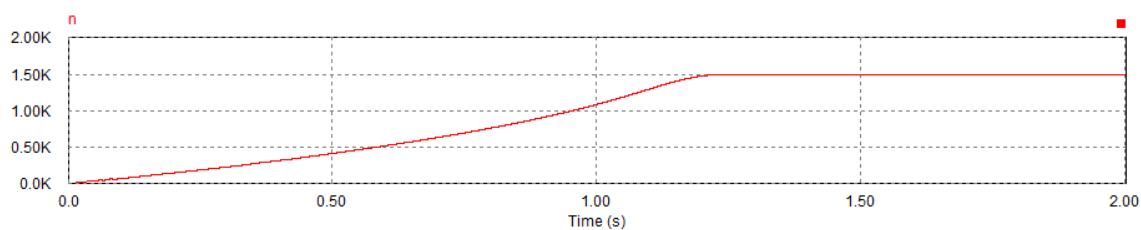


Figura 8.35 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 15 pols/semiperíode

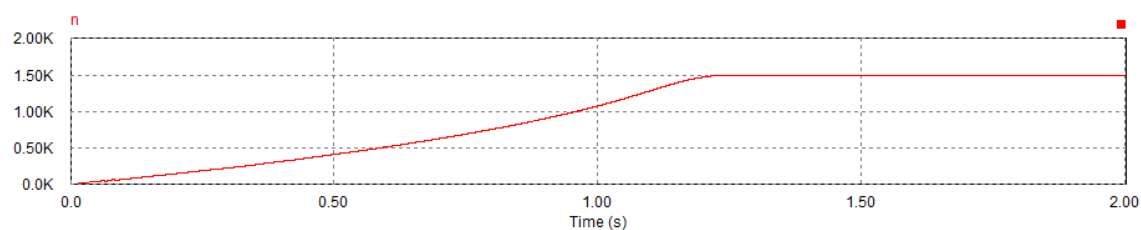


Figura 8.36 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 33 pols/semiperíode

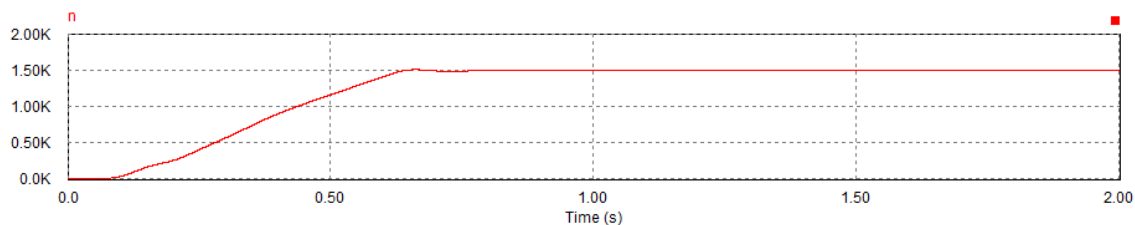


Figura 8.37 Gràfica de velocitat amb V/f constant i creixement lineal des de 0

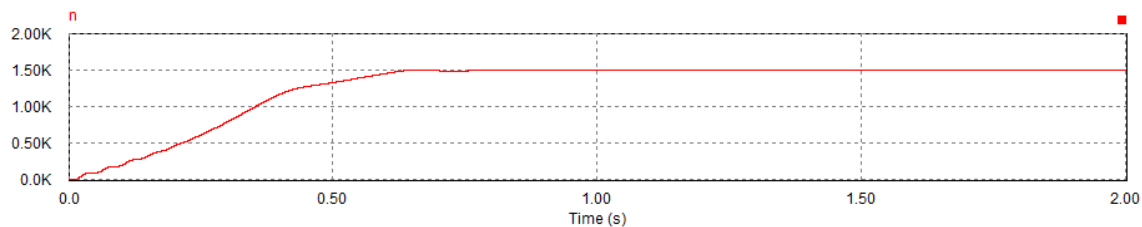


Figura 8.38 Gràfica de velocitat amb V/f constant i creixement lineal des de 0,5

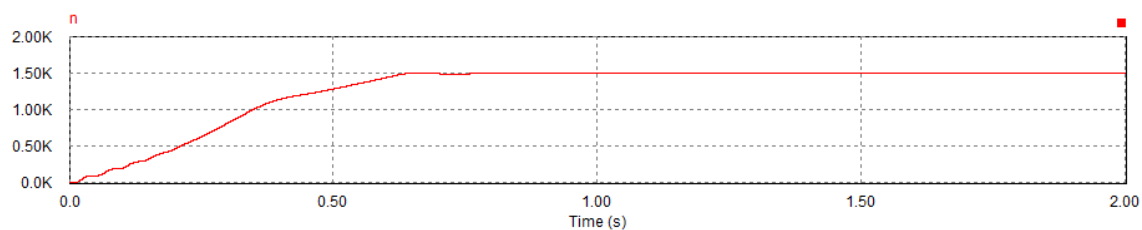


Figura 8.39 Gràfica de velocitat amb V/f constant i creixement exponencial

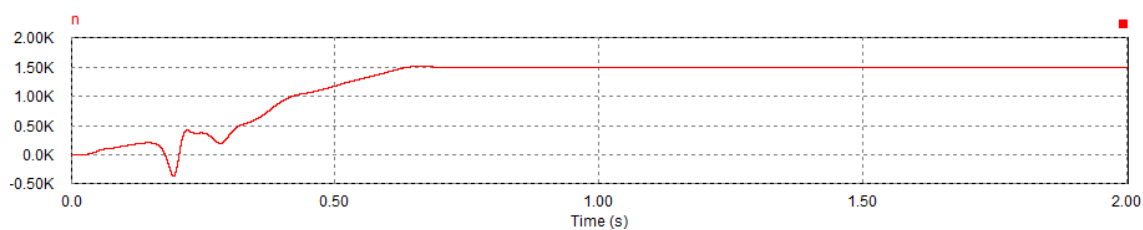


Figura 8.40 Gràfica de velocitat amb amplitud de V més gran que f

8.2.2 Càrrega mecànica constant

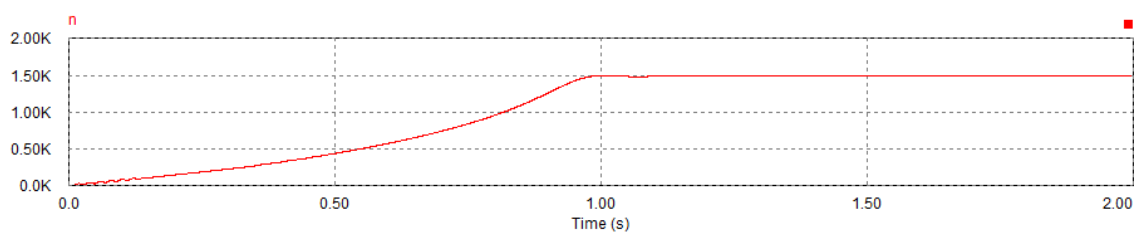


Figura 8.41 Gràfica de velocitat amb font trifàsica d'ona sinusoidal

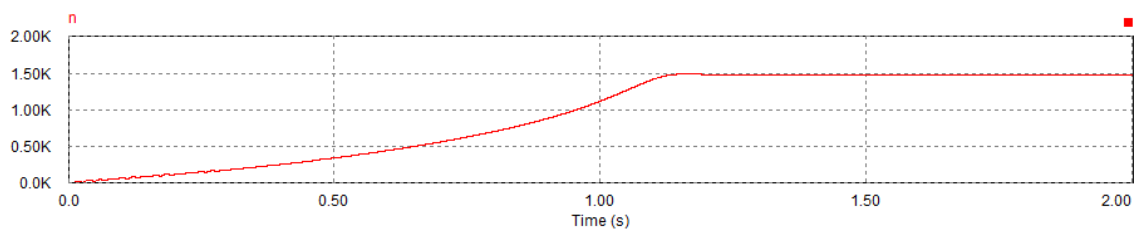


Figura 8.42 Gràfica de velocitat amb font de tensió d'ona quadrada

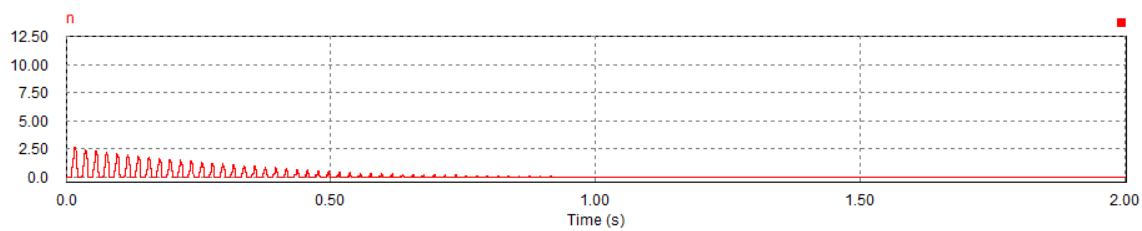


Figura 8.43 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 3 pols/semiperíode

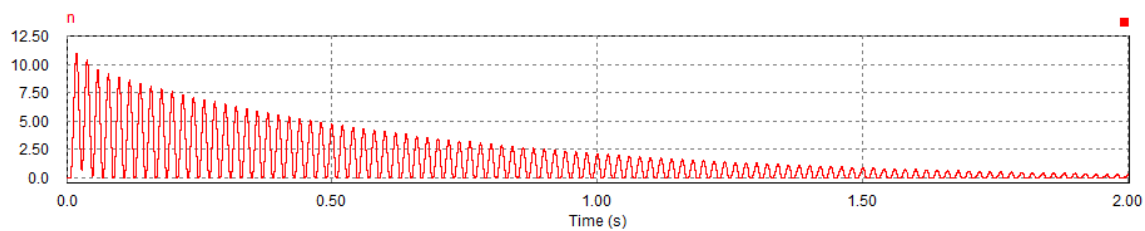


Figura 8.44 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 9pols/semiperíode

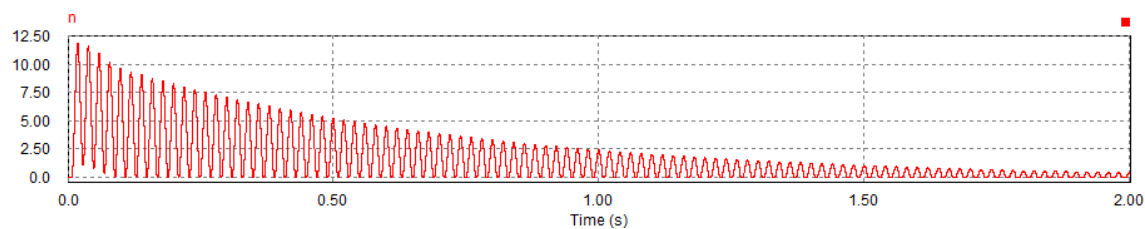


Figura 8.45 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 15pols/semiperíode

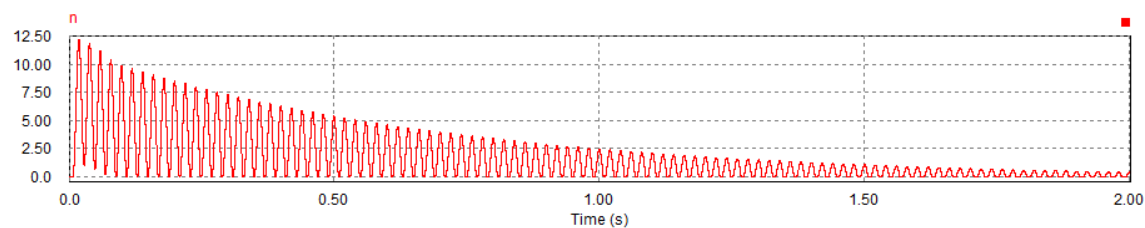


Figura 8.46 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 33pols/semiperíode

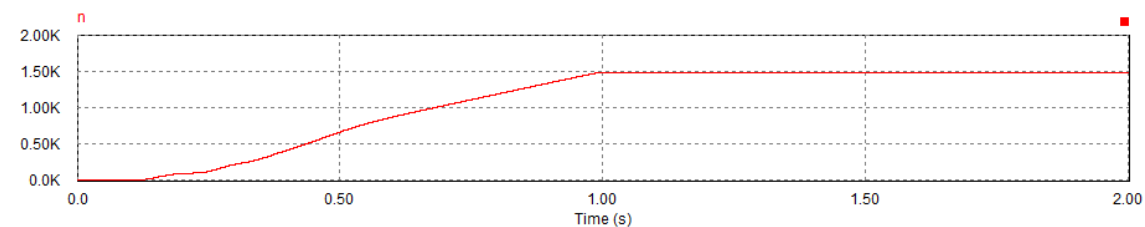


Figura 8.47 Gràfica de velocitat amb V/f constant i creixement lineal des de 0

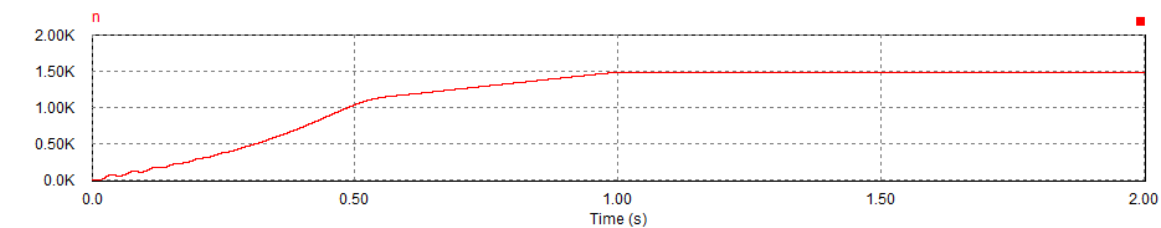


Figura 8.48 Gràfica de velocitat amb V/f constant i creixement lineal des de 0,5

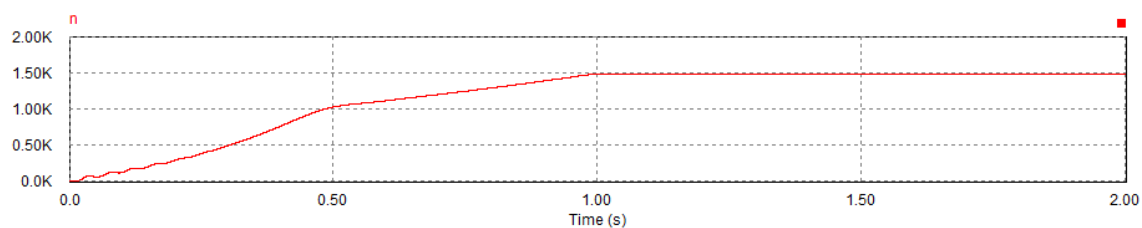


Figura 8.49 Gràfica de velocitat amb V/f constant i creixement exponencial

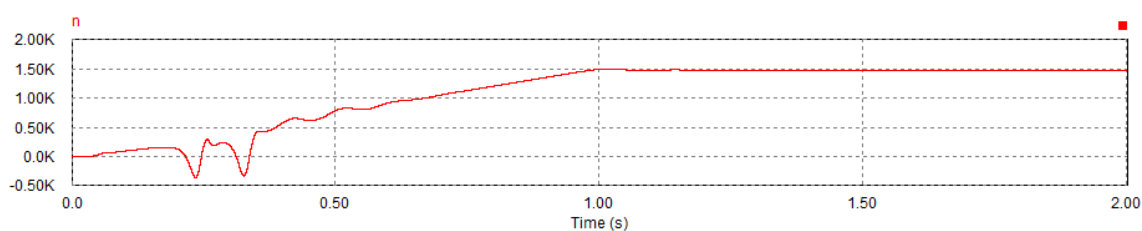


Figura 8.50 Gràfica de velocitat amb amplitud de V més gran que f

8.2.3 Càrrega mecànica parabòlica

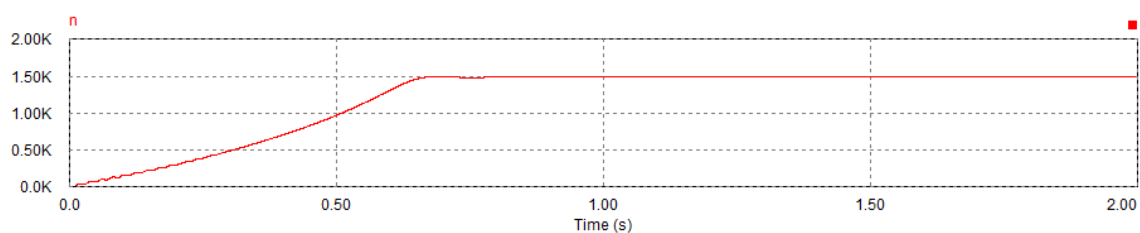


Figura 8.51 Gràfica de velocitat amb font trifàsica d'ona sinusoidal

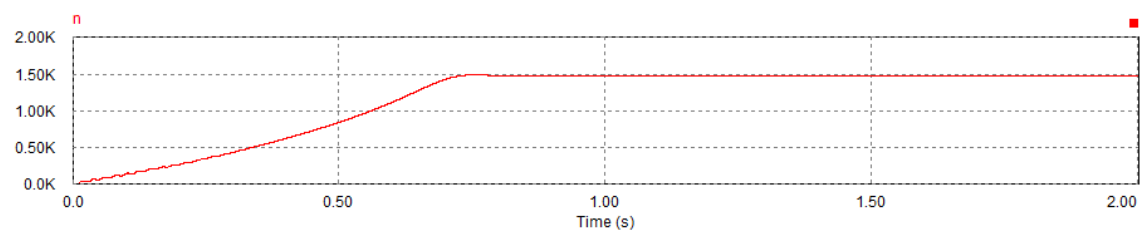


Figura 8.52 Gràfica de velocitat amb font de tensió d'ona quadrada

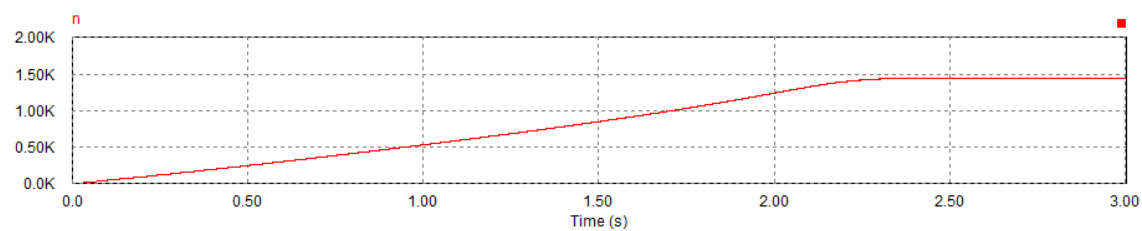


Figura 8.53 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 3 pols/semiperíode

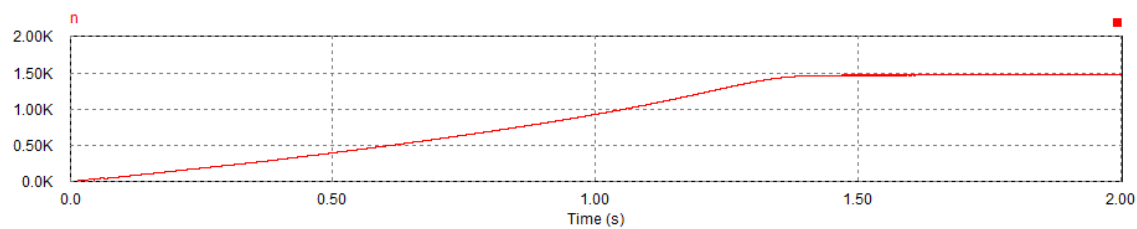


Figura 8.54 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 9 pols/semiperíode

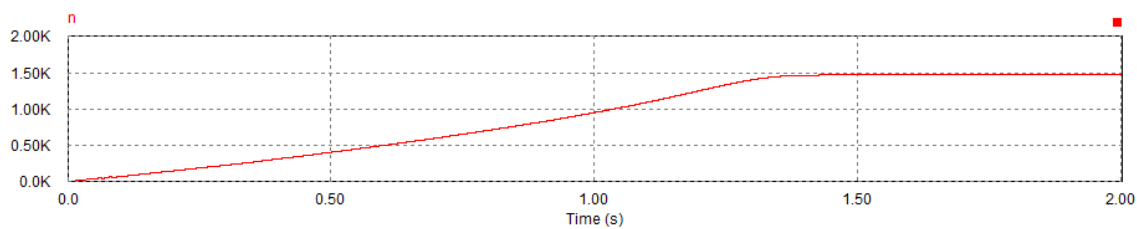


Figura 8.55 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 15 pols/semiperíode

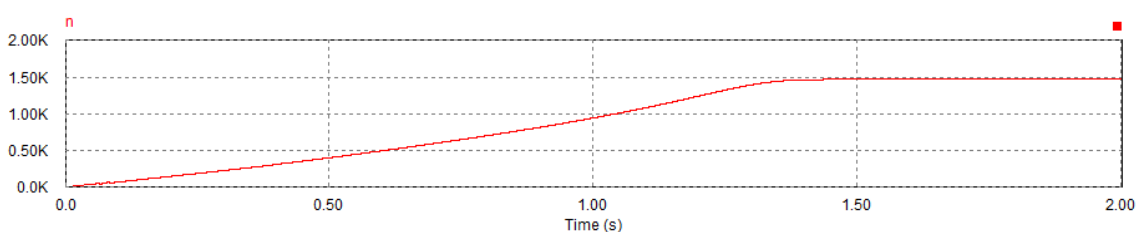


Figura 8.56 Gràfica de velocitat amb ona PWM de 33 pols/semiperíode

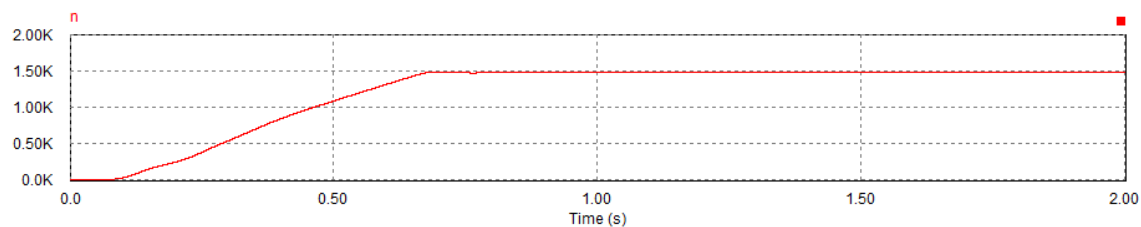


Figura 8.57 Gràfica de velocitat amb V/f constant i creixement lineal des de 0

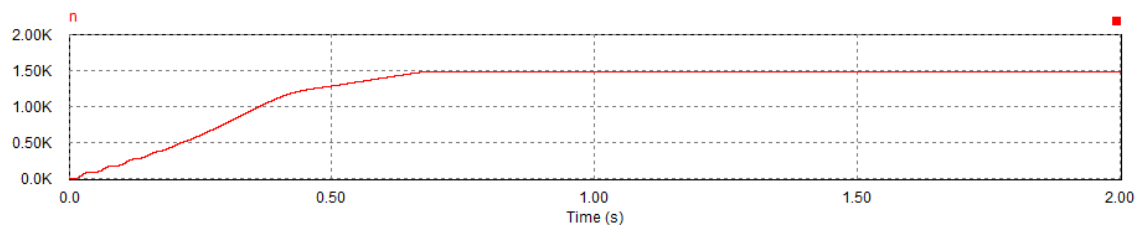


Figura 8.58 Gràfica de velocitat amb V/f constant i creixement lineal des de 0,5

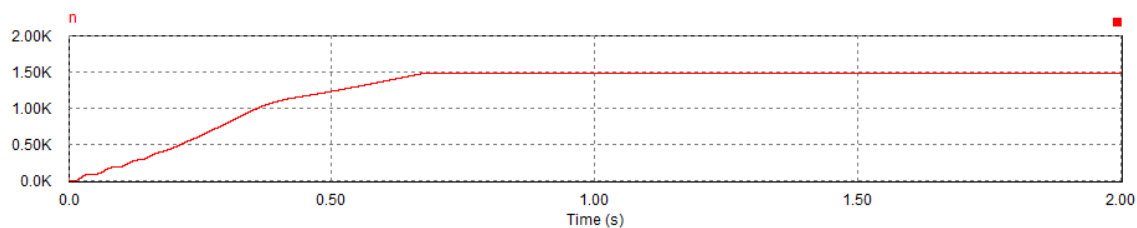


Figura 8.59 Gràfica de velocitat amb V/f constant i creixement exponencial

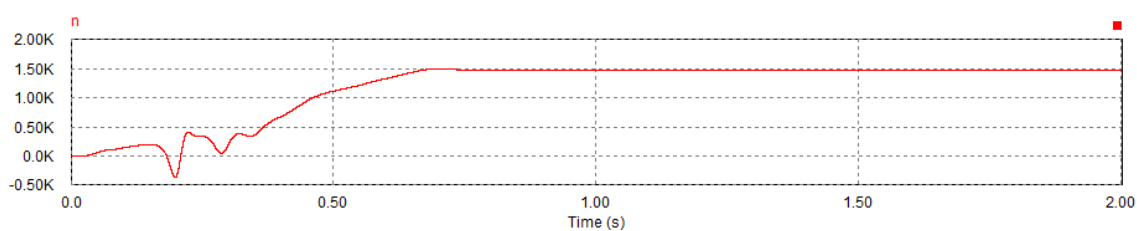


Figura 8.60 Gràfica de velocitat amb amplitud de V més gran que f

8.3 Gràfiques de parell

8.3.1 Càrrega mecànica en buit

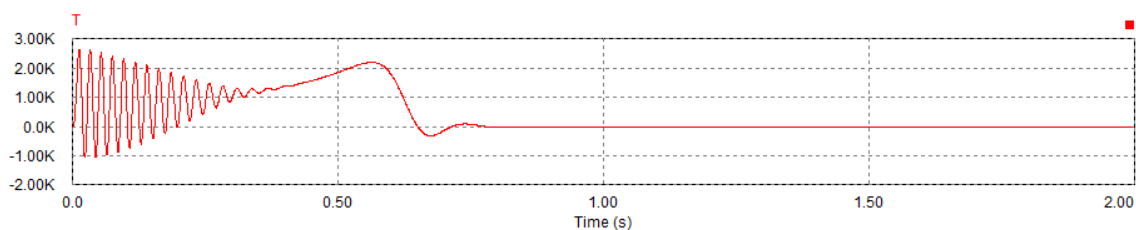


Figura 8.61 Gràfica de parell amb font trifàsica d'ona sinusoidal

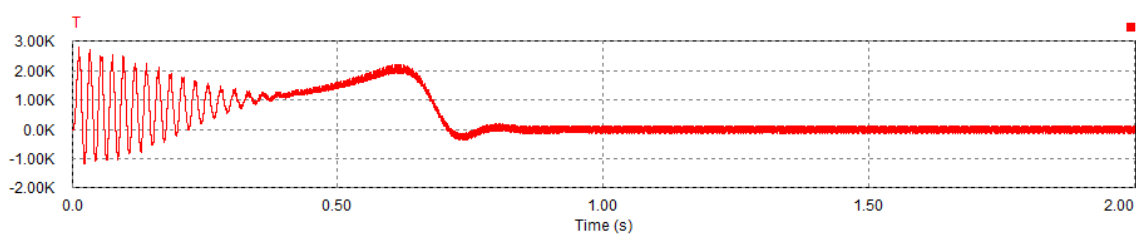


Figura 8.62 Gràfica de parell amb font de tensió d'ona quadrada

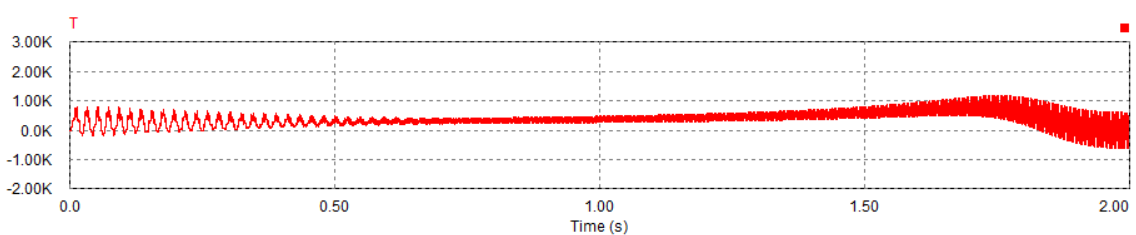


Figura 8.63 Gràfica de parell amb ona PWM de 3 pols/semiperíode

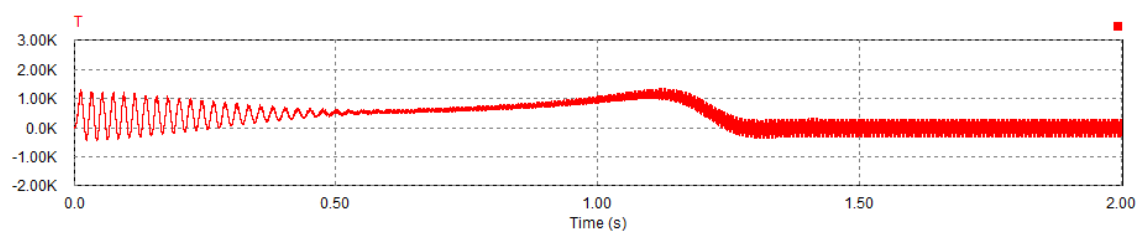


Figura 8.64 Gràfica de parell amb ona PWM de 9 pols/semiperíode

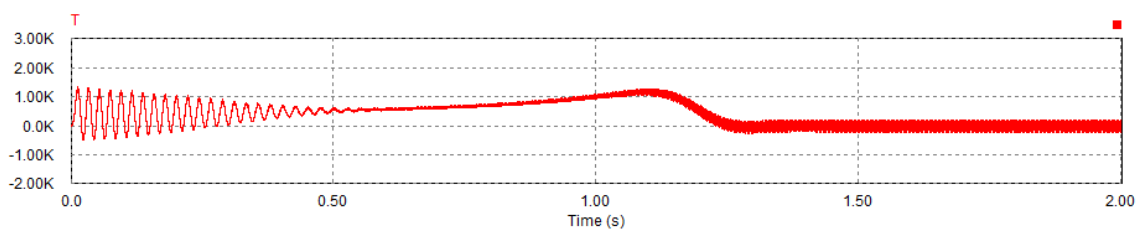


Figura 8.65 Gràfica de parell amb ona PWM de 15 pols/semiperíode

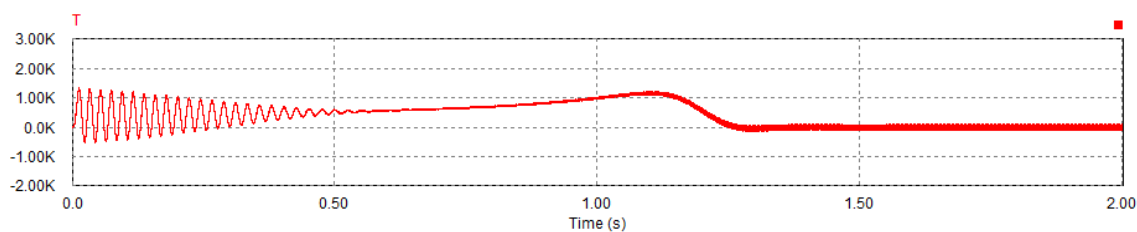


Figura 8.66 Gràfica de parell amb ona PWM de 33 pols/semiperíode

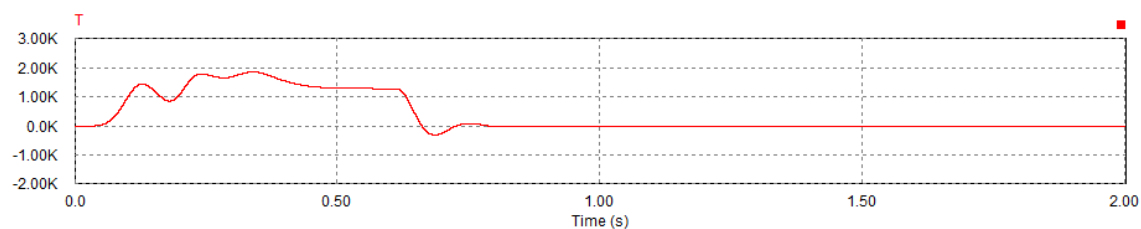


Figura 8.67 Gràfica de parell amb V/f constant i creixement lineal des de 0

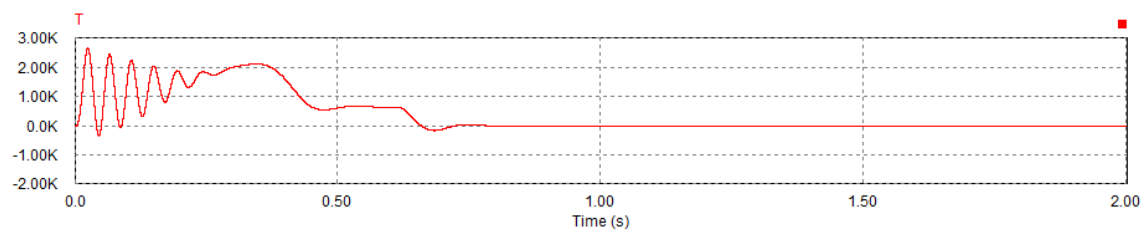


Figura 8.68 Gràfica de parell amb V/f constant i creixement lineal des de 0,5

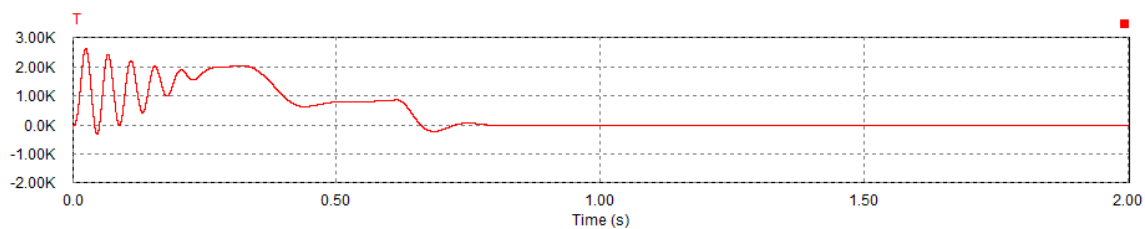


Figura 8.69 Gràfica de parell amb V/f constant i creixement exponencial

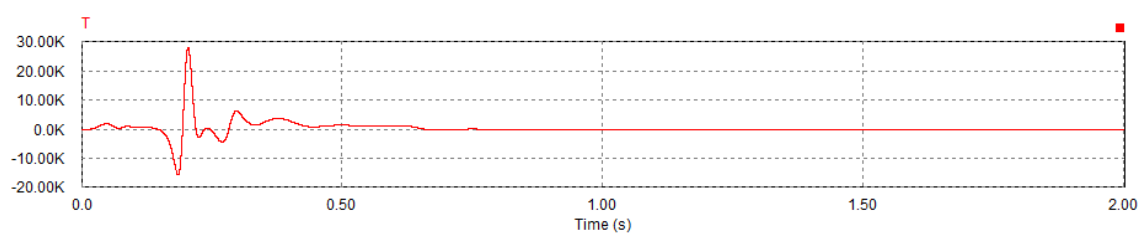


Figura 8.70 Gràfica de parell amb amplitud de V més gran que f

8.3.2 Càrrega mecànica constant

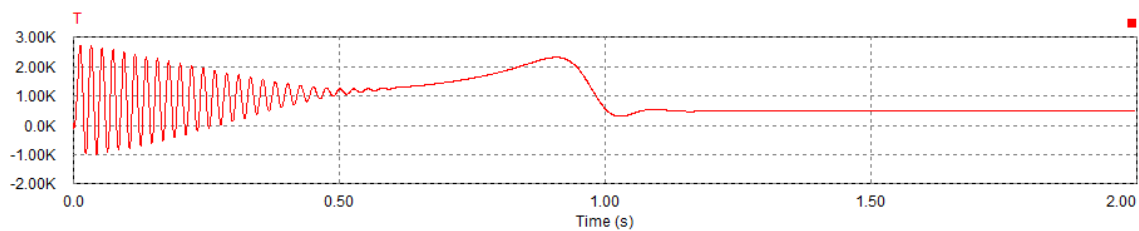


Figura 8.71 Gràfica de parell amb font trifàsica d'ona sinusoidal

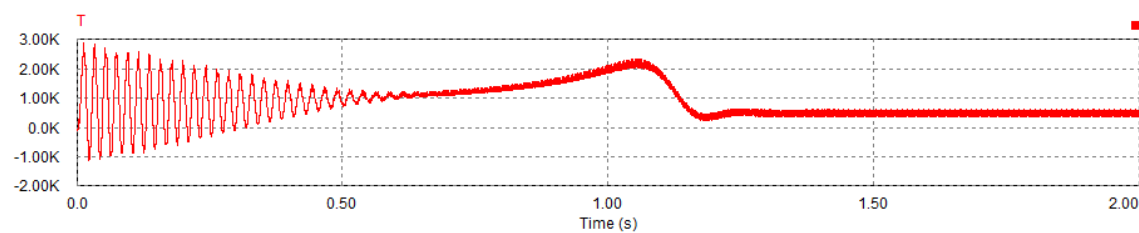


Figura 8.72 Gràfica de parell amb font de tensió d'ona quadrada

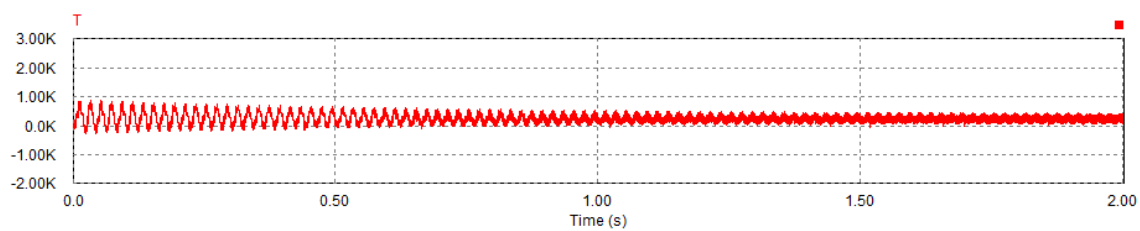


Figura 8.73 Gràfica de parell amb ona PWM de 3 pols/semiperíode

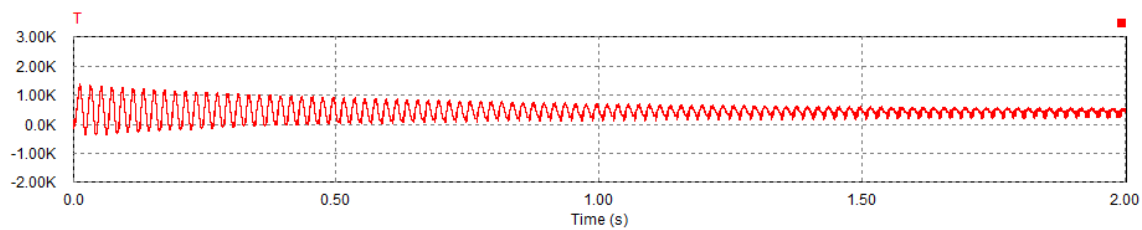


Figura 8.74 Gràfica de parell amb ona PWM de 9 pols/semiperíode

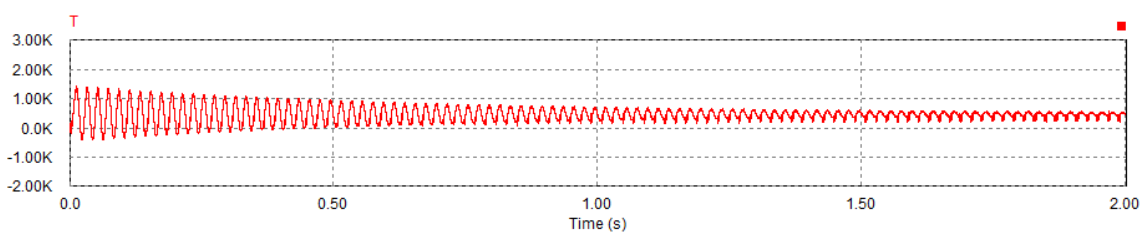


Figura 8.75 Gràfica de parell amb ona PWM de 15 pols/semiperíode

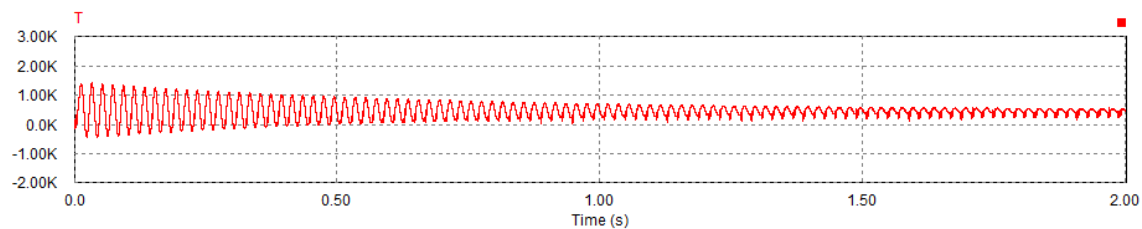


Figura 8.76 Gràfica de parell amb ona PWM de 33 pols/semiperíode

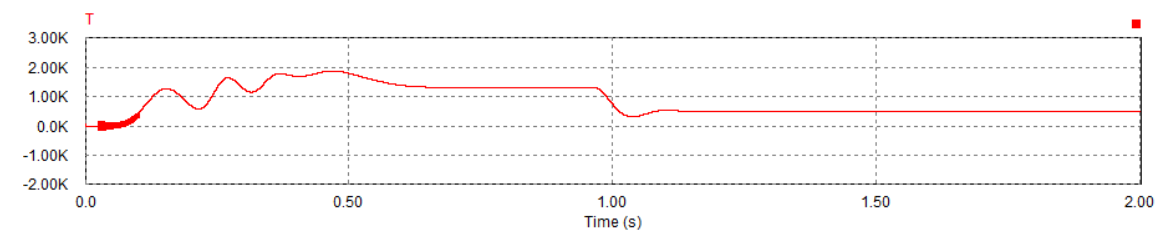


Figura 8.77 Gràfica de parell amb V/f constant i creixement lineal des de 0

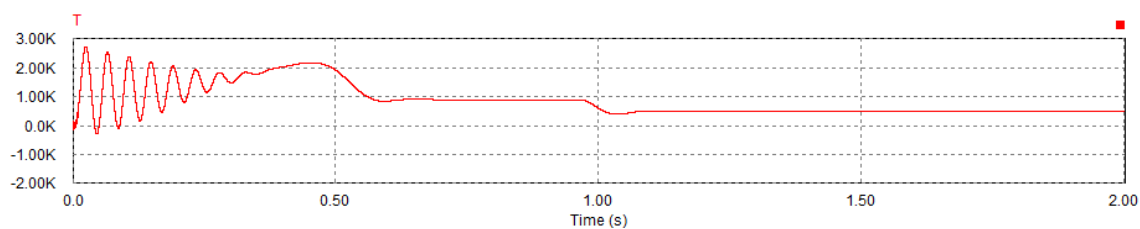


Figura 8.78 Gràfica de parell amb V/f constant i creixement lineal des de 0,5

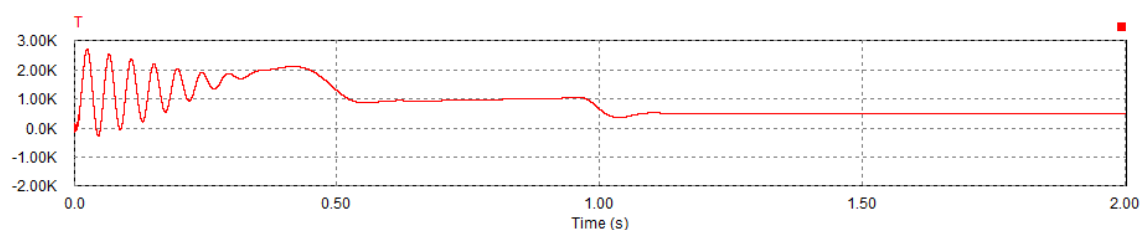


Figura 8.79 Gràfica de parell amb V/f constant i creixement exponencial

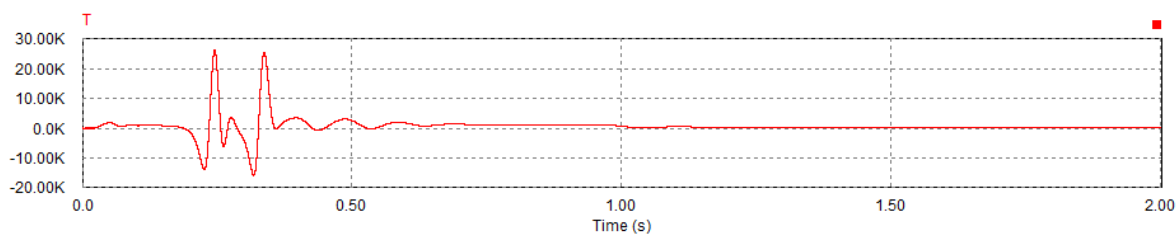


Figura 16 Gràfica de parell amb amplitud de V més gran que f

8.3.3 Càrrega mecànica parabòlica

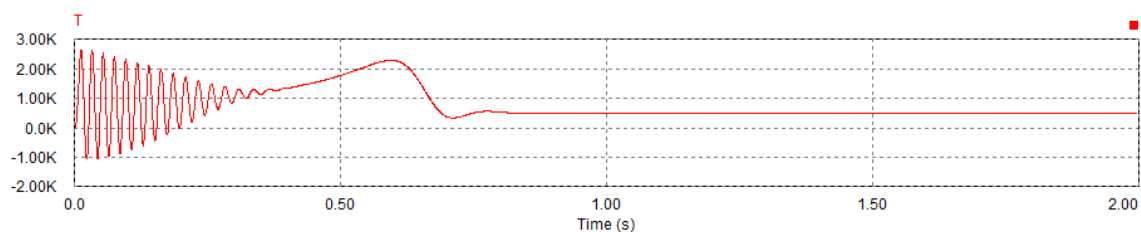


Figura 8.81 Gràfica de parell amb font trifàsica d'ona sinusoidal

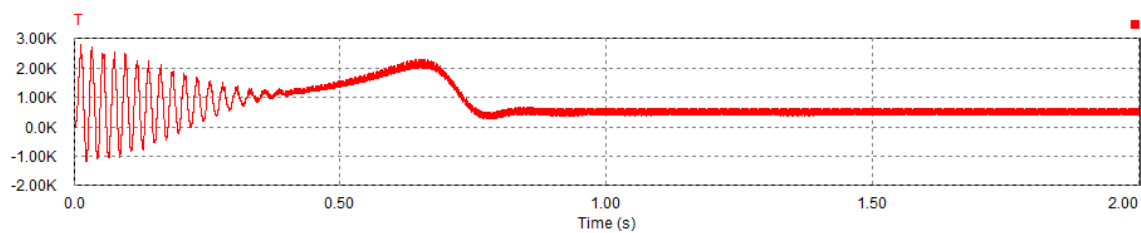


Figura 8.82 Gràfica de parell amb font de tensió d'ona quadrada

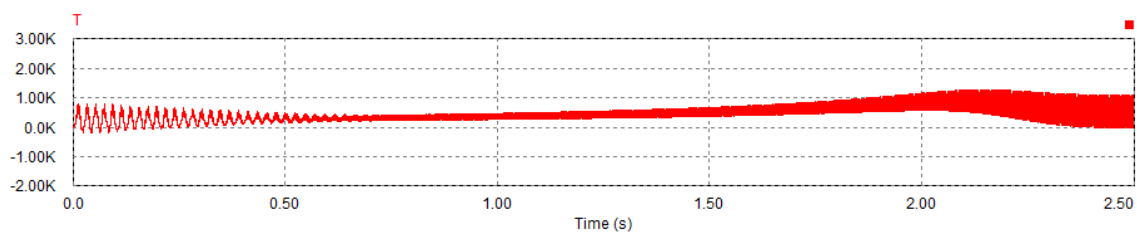


Figura 8.83 Gràfica de parell amb ona PWM de 3 pols/semiperíode

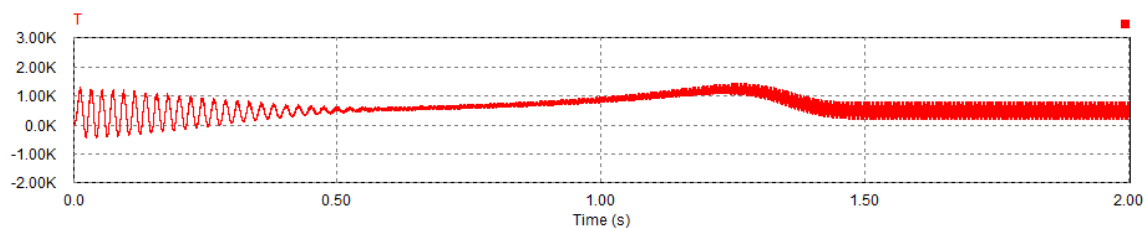


Figura 8.84 Gràfica de parell amb ona PWM de 9 pols/semiperíode

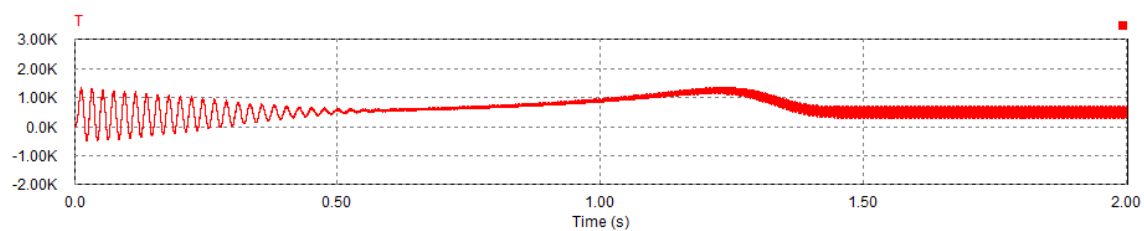


Figura 8.85 Gràfica de parell amb ona PWM de 15 pols/semiperíode

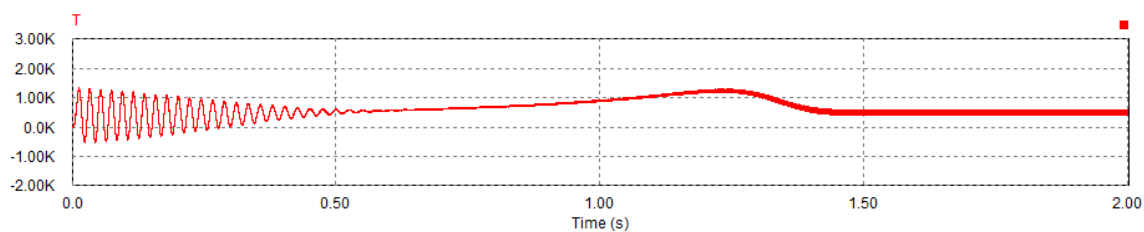


Figura 8.86 Gràfica de parell amb ona PWM de 33 pols/semiperíode

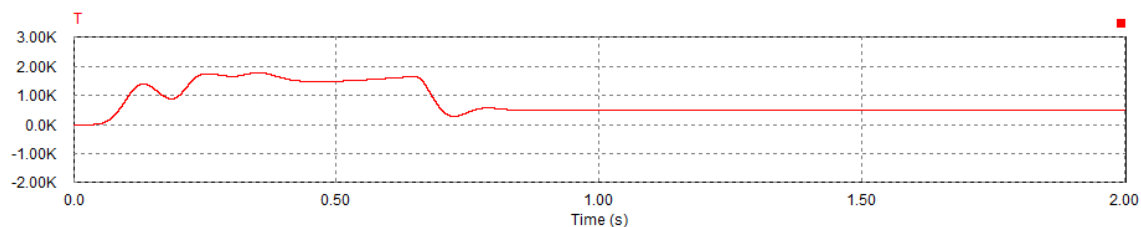


Figura 8.87 Gràfica de parell amb V/f constant i creixement lineal des de 0

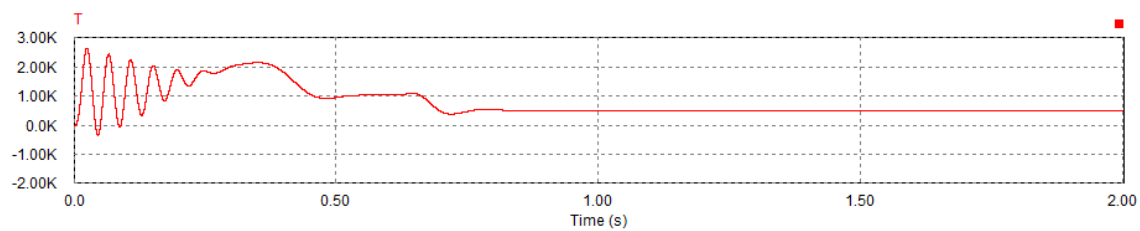


Figura 8.88 Gràfica de parell amb V/f constant i creixement lineal des de 0,5

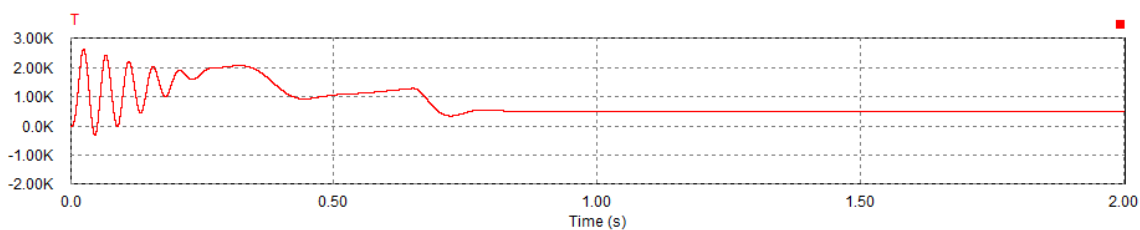


Figura 8.89 Gràfica de parell amb V/f constant i creixement exponencial

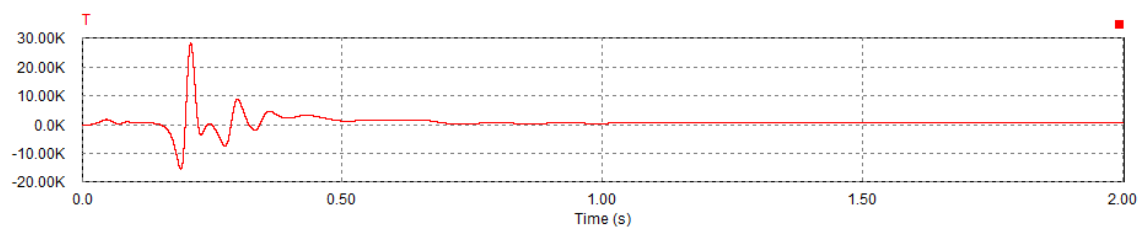


Figura 8.90 Gràfica de parell amb amplitud de V més gran que f

8.4 Gràfiques d'armònics de intensitat i de tensió

8.4.1 Ona Quadrada



Figura 8.91 Gràfica de la transformada de Fourier amb font de tensió d'ona quadrada

8.4.2 Ona PWM

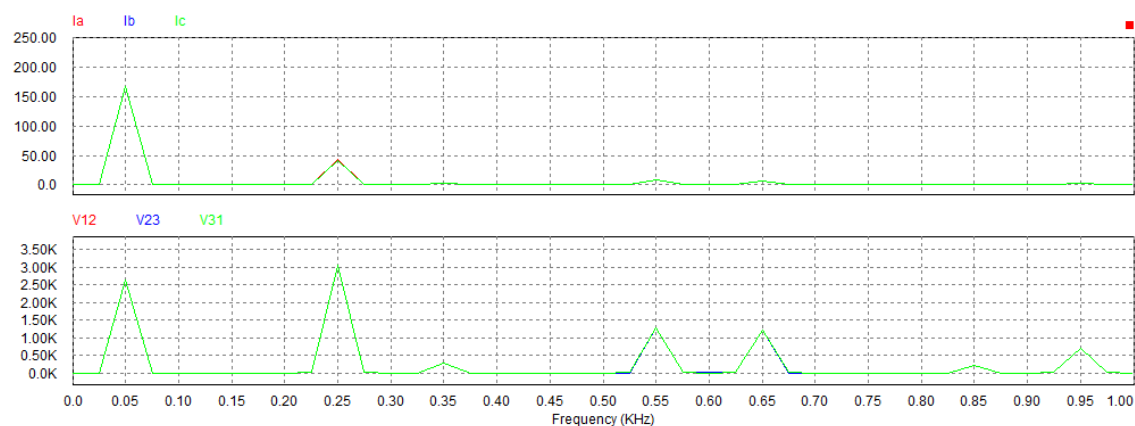


Figura 8.92 Gràfica de la transformada de Fourier amb ona PWM de 3 pols/semiperíode



Figura 8.93 Gràfica de la transformada de Fourier amb ona PWM de 9 pols/semiperíode



Figura 8.94 Gràfica de la transformada de Fourier amb ona PWM de 15 pols/semiperíode

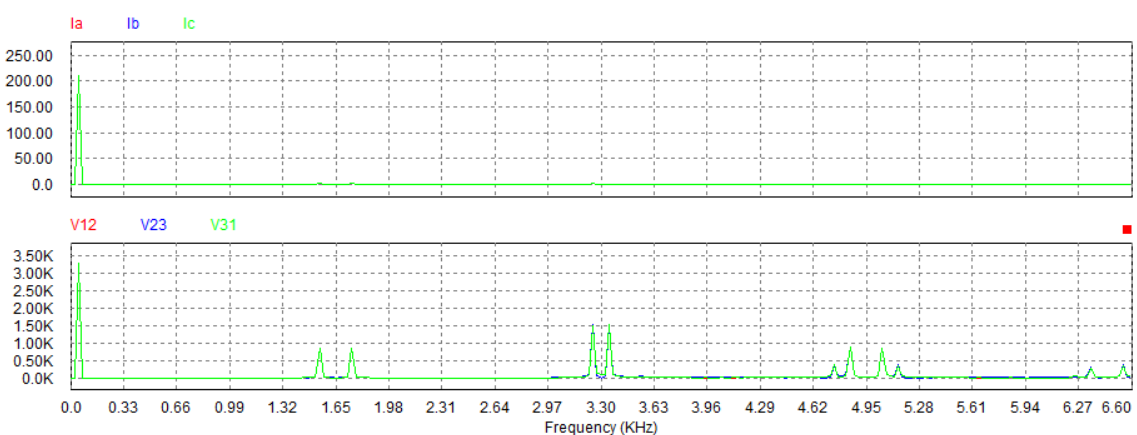


Figura 8.95 Gràfica de la transformada de Fourier amb ona PWM de 33 pols/semiperíode

8.5 Comparació entre comportament real i simulat

8.5.1 Introducció

Una vegada examinat el comportament del motor mitjançant els diferents sistemes d'accionament en funció de les fonts de tensió, es va observar que en l'accionament mitjançant ona PWM i en concret, amb una càrrega constant, el motor no arribava a engegar. Per aquesta raó, l'objectiu era ara analitzar la corba característica mecànica del motor i poder raonar la causa per la qual el motor no engegava.

Per analitzar la característica mecànica del motor, es van realitzar una sèrie de càlculs, i així, poder representar gràficament i comparar el comportament real mecànic del motor amb el comportament mecànic del motor simulat.

8.5.2 Característica mecànica del motor d'inducció

La corba típica del parell-velocitat d'un motor d'inducció ens mostra diferents punts importants d'informació sobre l'operació dels motors d'inducció:

- El parell induït del motor és zero a velocitat síncrona.
- És aproximadament lineal entre buit i càrrega.
- Hi ha un parell màxim possible que no es pot excedir, que és dos o tres vegades al parell nominal a plena càrrega del motor.
- El parell d'engegada del motor és una mica major al parell a plena càrrega.

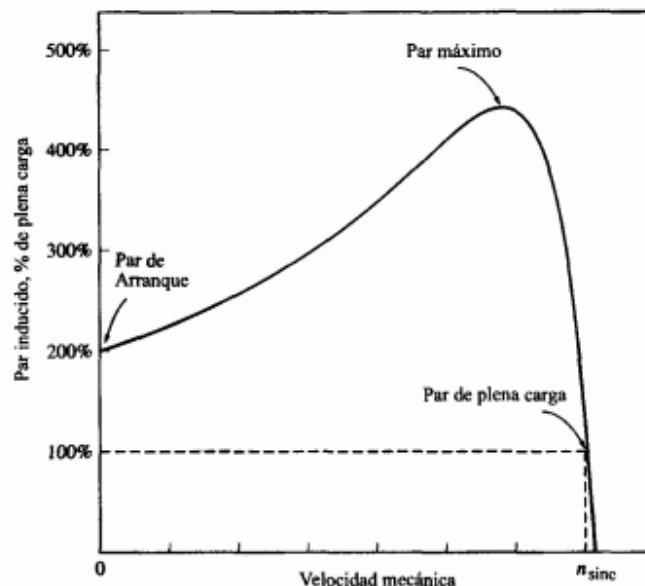


Figura 8.98 Corba típica d'un motor d'inducció

Els punts més característics en la gràfica de la Figura 8.98 són:

- Funcionament en sincronisme: $s=0$; $T=0$, en aquest cas la velocitat de rotació del motor és la de sincronisme. Que el parell electromagnètic produït resulti igual a

zero està corroborant que la màquina a aquesta velocitat no podria vèncer els parells resistents.

- Règim nominal: $s=s_n$; $T=T_n$, que correspon a la velocitat assignada i al parell nominal o de plena càrrega, es produeix generalment per lliscament compresos entre el 3 i 8 per cent, que representen velocitats pròximes a la de sincronisme que es situen en la part dreta de la corba.
- Funcionament amb parell màxim: $s=s_m$; $T=T_m$, representen el parell màxim del motor i es produeix per lliscament compresos entre el 10 i el 35 per cent.
- Règim d'engegada: $s=1$; $T=T_e$, en aquest cas la velocitat es zero y correspon al parell d'engegada.

8.5.3 Càlcul del comportament mecànic

Per realitzar els pertinents càlculs, s'ha escollit del document [2], els valors dels diferents components del circuit equivalent per tal d'obtenir la corba característica, on observem el comportament del motor estudiat. Aquestes dades que obtindrem seran aproximades a les dades que hauríem obtingut, si haguéssim efectuat els assajos en el laboratori.

El circuit equivalent té com a objectiu analitzar el comportament de la màquina a partir d'un circuit elèctric que tradueixi, de la manera més aproximada possible, el comportament real del motor.

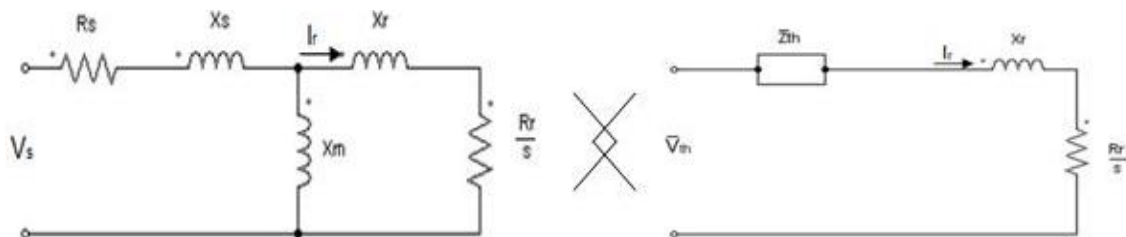


Figura 8.96 Equivalent de Thévenin

L'expressió del parell del motor d'inducció és la següent:

$$T = \frac{3R_r'}{\omega_s \cdot s} \cdot I_r^2 \quad (8.1)$$

On al realitzar el circuit equivalent de Thévenin obtenim la següent expressió del parell:

$$T_{sim} = \frac{3R_r}{\omega_s \cdot s} \cdot \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_r)^2} \quad (8.2)$$

Annexes

On el lliscament s ve representat per la següent expressió:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (8.3)$$

I on la velocitat de sincronisme n_s és igual a:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (8.4)$$

La velocitat angular s s'expressa com:

$$\omega_s = \frac{2\pi}{f} \quad (8.5)$$

I la relació entre la ω_s i la n_s està expressada com:

$$\frac{f}{p} = \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{n_s}{60} \quad (8.6)$$

La tensió Thévenin ve representada en la següent fórmula:

$$\bar{V}_{th} = \frac{jX_m}{R_s + j(X_s + X_m)} \cdot \bar{V}_s \quad (8.7)$$

On la tensió a l'estator és:

$$\bar{V}_s = \frac{V_s}{\sqrt{3}} \quad (8.8)$$

La impedància Thévenin ve donada en la següent expressió:

$$\bar{Z}_{th} = R_{th} + jX_{th} = \frac{jX_m \cdot (R_s + jX_s)}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (8.9)$$

Un cop es tenen les dades resultants de les expressions del circuit equivalent, es realitzarà la següent taula per tal de poder representar i comparar posteriorment la corba característica real del motor amb la simulada.

n (rpm)	s	T_{real} (Nm)	T_{sim} (Nm)	T_N (Nm)
0,0	1,000	649,2	316,2	492,2
207,0	0,862	652,5	360,8	492,2
419,0	0,721	672,8	421,0	492,2
623,0	0,585	704,5	500,3	492,2
755,0	0,497	734,5	568,1	492,2
964,0	0,357	809,3	715,0	492,2
1.121,0	0,253	899,7	864,1	492,2
1.173,0	0,218	935,6	917,2	492,2
1.202,0	0,199	955,4	945,2	492,2
1.233,0	0,178	974,9	971,7	492,2
1.297,0	0,135	996,9	1.000,6	492,2
1.328,0	0,115	987,4	990,0	492,2
1.341,5	0,106	975,9	977,2	492,2
1.359,0	0,094	951,9	950,8	492,2
1.373,0	0,085	923,4	920,1	492,2
1.387,0	0,075	884,8	879,3	492,2
1.402,0	0,065	830,1	822,5	492,2
1.414,0	0,057	774,6	765,9	492,2
1.426,0	0,049	707,5	698,2	492,2
1.438,5	0,041	623,9	615,0	492,2
1.464,0	0,024	401,5	401,5	492,2
1.476,0	0,016	280,4	280,1	492,2
1.480,5	0,013	235,2	231,2	492,2
1.488,0	0,008	146,1	145,9	492,2

Taula 8.97 Estudi característica mecànica

8.5.4 Anàlisi entre la característica mecànica real i simulada

A través de la Figura 8.99, que resulta de la representació de la taula anterior, es poden apreciar les diferències que existeixen en les condicions d'engegada, al igual que en la magnitud de parell màxim.

Si analitzem el parell en el gràfic veiem com l'engegada en la simulació està per sota del parell nominal a plena càrrega, i com a conseqüència alhora de fer la simulació amb el convertidor PWM amb la consigna de tensió i freqüència, el motor no arriba a accionar la càrrega constant i no engega.

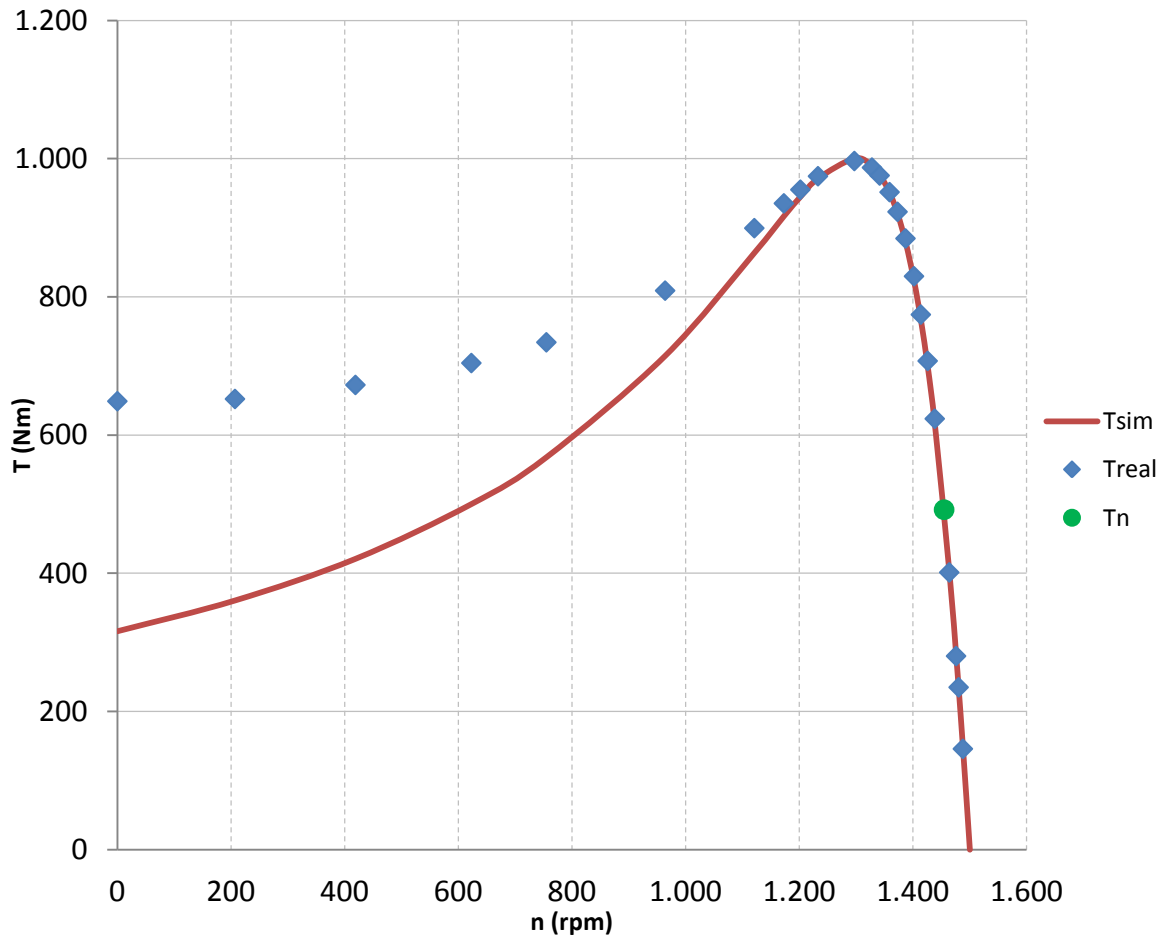


Figura 8.99 Corba característica

D'altra banda entre la corba del circuit real i el simulat, hi ha una zona entre buit i plena càrrega que és quasi lineal. El parell d'engegada en el circuit real és superior al del simulat i supera el parell a plena càrrega. En canvi, el parell màxim en la corba del circuit equivalent real és lleugerament inferior que en el simulat, en el circuit equivalent simulat és de 1.000,6 Nm i en el real es de 996,9 Nm.

Tot i algunes diferències, es pot apreciar que té una bona resposta en l'aproximació des de la zona de parell màxima fins al funcionament en sincronisme, passant per la zona estable o de règim nominal.

8.6 Punt de funcionament nominal

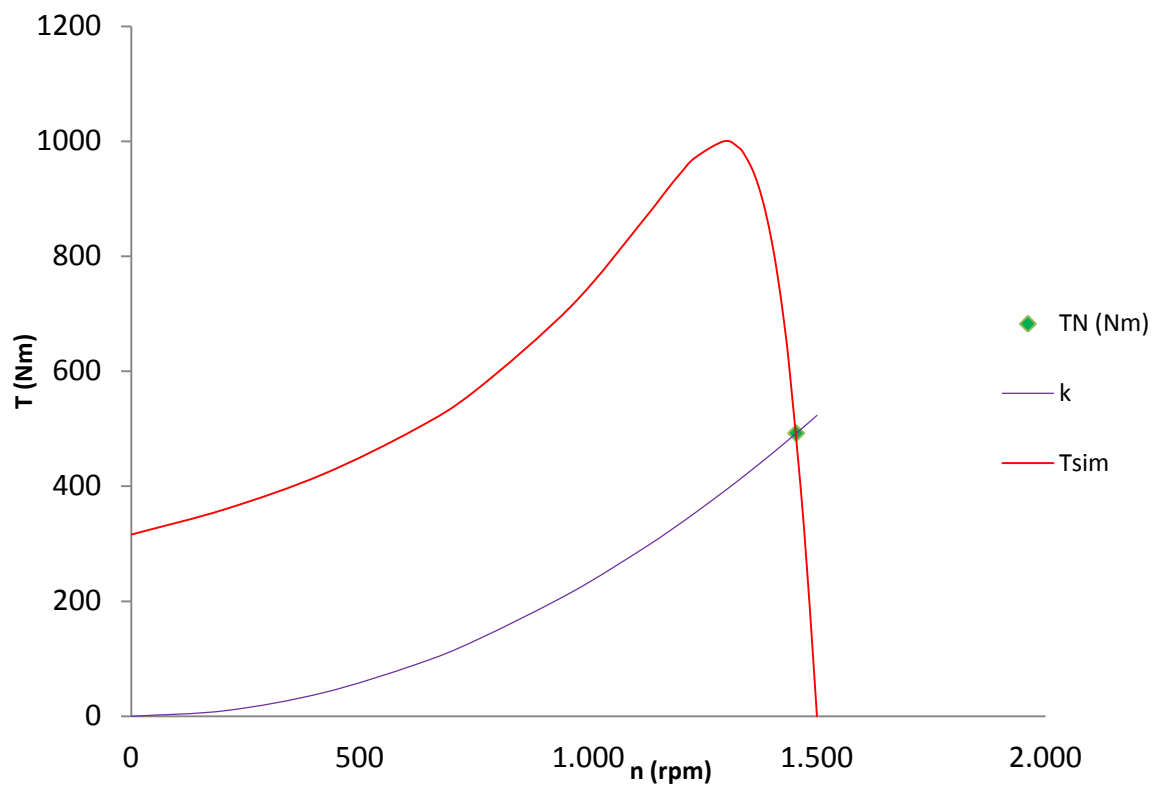


Figura 8.100 Punt d'intersecció

