Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Titulació:

Enginyeria Industrial

Alumne (nom i cognoms):

Joaquim Saumell Montserrat

Títol PFC:

Estudi del sistema de Recuperació d'Energia AFE (Active Front End)

Director del PFC:

Jaume Saura *Perise*

Convocatòria de lliurament del PFC:

Gener 2014

Contingut d'aquest volum: **-MEMÒRIA-**

Resum

En aquest projecte es farà l'estudi del sistema AFE (Active Front End), treballant en mode regeneratiu. En primer lloc, es descriuran els elements que conformen el sistema AFE i les seves funcions. Després es determinaran els diferents modes de funcionament i es plantejaran els principis teòrics, que ho fan possible. En aquesta part, també s'estudiarà la sincronització dels senyals de l'AFE amb els de la font principal.

En la segona part del projecte, es farà l'estudi experimental del sistema treballant en diferents modes de funcionament. Primer, es comprovarà el funcionament de l'AFE davant d'un sot de tensió en la font principal i s'estudiarà el control actiu del sistema. A continuació, s'estudiarà experimentalment la recuperació d'energia mitjançant el sistema AFE, en l'aturada d'un motor. En aquesta part del projecte s'estudiarà més detalladament el sistema AFE en mode regeneratiu.

Els paràmetres analitzats en els assajos seran: tensions, corrents, velocitat, parell i potències. A partir de les dades recollides i l'estudi analític d'aquestes, s'esperen obtenir resultats avaluables en referència a la utilització del sistema AFE com a recuperador d'energia.

Abstract

This project will study the Active Front End system working in regenerative mode. First will be described the elements that take part in the AFE rectifier working and this function. Then will be concrete types of working modes of the AFE and the theoretical principles, which make it possible. In the same Chapter, will be studied the AFE system synchronization with main power supply.

The second part of the project, will make the experimental study of the rectifier working in different situations. First will be checked the rectifier in front of a tension gap. Then will be studied the AFE system in regenerative mode, when a motor stop.Will be in this case when a more detailed study of data will be made.

The parameters that will be studied are: tension, current, rotational speed, torque and power. In this way, will be obtained valuable results of the energy recovered by the AFE system.

ÍNDEX

Objectius 4
Abast 4
1. Rectificador actiu AFE (Active Front End) 6
1.1. Introducció 6
1.2. Descripció del rectificador AFE 8
2. Constitució i funcionament del rectificador AFE 12
2.1. Constitució del rectificador AFE 12
2.1.1. Rectificador 12
2.1.2. Filtre LCL 13
2.1.3. Circuit de precàrrega 15
2.1.4. Bus de continua 16
2.2. Funcionament 20
3. Inversor DC/AC 27
3.1. Introducció 27
3.2. Descripció i funcionament 27
3.3. Connexió amb el rectificador AFE 29
4. Equips i muntatge utilitzats en estudi experimental del rectificador AFE 31
4.1. Introducció als assajos 31
4.2. Presentació dels equips escollits 35
4.2.1. Rectificador Active Front End (AFE) 36
4.2.2. Unitat Inversora (INU) 37
4.2.3. Motor asíncron de gàbia d'esquirol 40
5. Estudi experimental del rectificador AFE davant un sot de tensió 43
5.1. Introducció 43
5.2. Sots de tensió 44
5.2.1. Caracterització dels sots de tensió 44
5.2.2. Efectes dels sots de tensió 45
5.3. Resultats dels assajos davant un sot de tensió 45

5.3.1. Resultats de l'Assaig 1: rectificador AFE davant un sot de 0,1s.... 46
5.3.2. Resultats de l'Assaig 2: rectificador AFE davant un sot de 0,2s.... 50
5.4. Anàlisi dels resultats de rectificador AFE davant un sot de tensió..... 53
5.4.1. Anàlisi dels senyals de tensió 54
5.4.2. Anàlisi dels senyals de corrent 57
5.4.3. Càlcul i anàlisi dels desfasaments 59
5.4.4. Comprovació dels senyals de velocitat i parell..... 61
5.4.5. Anàlisi de les potències calculades..... 62
5.4.6. Càlcul i anàlisi dels rendiments..... 65
6. Estudi experimental de l'AFE en mode regeneratiu 67
6.1. Introducció..... 67
6.2. Mode regeneratiu 68
6.3. Resultats dels assajos de l'AFE en mode regeneratiu 68
6.3.1. Assaig 3: Resultats en mode regeneratiu amb el motor treballant en buit 69
6.3.2. Assaig 4: Resultats en mode regeneratiu amb el motor treballant amb càrrega 73
6.4. Avaluació dels resultats de l'AFE treballant en mode regeneratiu..... 76
6.4.1. Anàlisi dels senyals de tensió 76
6.4.2. Anàlisi dels senyals de corrent 80
6.4.3. Càlcul i anàlisi dels desfasaments 82
6.4.4. Comprovació dels senyals de velocitat i parell..... 84
6.4.5. Anàlisi de les potències calculades..... 85
6.4.6. Càlcul i anàlisi dels rendiments..... 87
6.4.7. Anàlisi de l'energia recuperada..... 88
6.5. Valoració del rectificador AFE en mode regeneratiu 89
6.5.1. Valoració econòmica de la utilització del rectificador AFE 89
6.5.2. Valoració ecològica de la utilització de l'AFE 92
7. Conclusions..... 93
Bibliografia..... 95

Objectius

L'objectiu d'aquest projecte és estudiar experimentalment el funcionament del sistema AFE (Active Front End), per veure'n el comportament davant diferents situacions. Aquest estudi vol mesurar i analitzar el comportament del sistema AFE en situacions anormals, com els sots de tensió i en especial en situacions d'inversió, en les que es retorna energia a la xarxa.

Finalment, es volen aconseguir resultats, que permetin avaluar el funcionament del sistema AFE en mode regeneratiu, i a partir d'aquests determinar els avantatges que aporta la seva utilització.

Abast

Aquest projecte començarà estudiant les bases teòriques que fan possible el funcionament del sistema AFE. En aquesta fase s'estudiaran els elements que formen el sistema AFE i el seu paper dins d'aquest. A més, es determinaran les característiques dels equips escollits per a l'estudi experimental.

A continuació, es realitzarà un estudi experimental en el que es mesuraran i analitzaran diferents paràmetres. Aquí es comprovarà el funcionament del sistema AFE davant un sot de tensió, mentre alimenta un motor. D'aquesta manera es pretén veure com afecten aquestes anomalies al sistema i al funcionament del motor. Per altra banda, es vol estudiar el sistema AFE en mode regeneratiu i la capacitat de retornar l'energia a la xarxa. Per estudiar l'AFE funcionant com a inversor s'analitzarà el sistema durant l'aturada del motor.

Finalment, utilitzant els resultats obtinguts, es valoraran els avantatges de la utilització del sistema AFE en l'alimentació d'un motor.

1. Rectificador actiu AFE (Active Front End)

En aquest capítol es presenta el rectificador Active Front End (AFE)l (regeneratiu). En primer lloc es presentarà la tipologia de rectificador AFE, fent referència, de forma general, a les seves característiques i els principals avantatges i desavantatges respecte altres rectificadors. Després es descriurà, a grans trets, el rectificador AFE i el seu muntatge i funcionament.

1.1. Introducció

Els rectificadors AFE s'utilitzen per alimentar sistemes de potència AC/DC. Tal com indica el seu nom, rectificador actiu, consisteixen en rectificadors de transistors IGBT controlats, que s'utilitzen per la conversió AC/DC. A més, la tipologia *Front End*, fa referència a la utilització d'un bus de continua per a l'alimentació de diferents equips amb una única font AC, habitualment la xarxa.

Aquesta tipus de rectificadors permeten la utilització d'un únic rectificador, que pot donar potència a múltiples equips. Els equips connectats a la banda del bus DC, no cal que tinguin les mateixes necessitats a nivell de tensió, corrent o potència, és per això que és habitual tenir muntatges com els de la Figura 1.1. La utilització d'un inversor entre el bus DC i l'equip permet adequar la tensió a les necessitats de cada aparell. A més, com ja s'ha esmentat, el control actiu del rectificador permetrà adequar el consum de potència del sistema, segons les necessitats demandades en cada instant, tot mantenint constant la tensió en el bus DC.

La característica més important d'aquest tipus de rectificadors és la capacitat de funcionar de forma bidireccional. La utilització del bus de continua, no només permet l'intercanvi d'energia entre equips, si no que també permet retornar energia a la font de potència AC. D'aquesta manera s'obté un sistema de potència simple, ja que només requereix un rectificador des de la font principal fins a la distribució

de potència, econòmic i sostenible, ja que el reaprofitament de l'energia sobrant del equips permet reduir el consum total de potència.

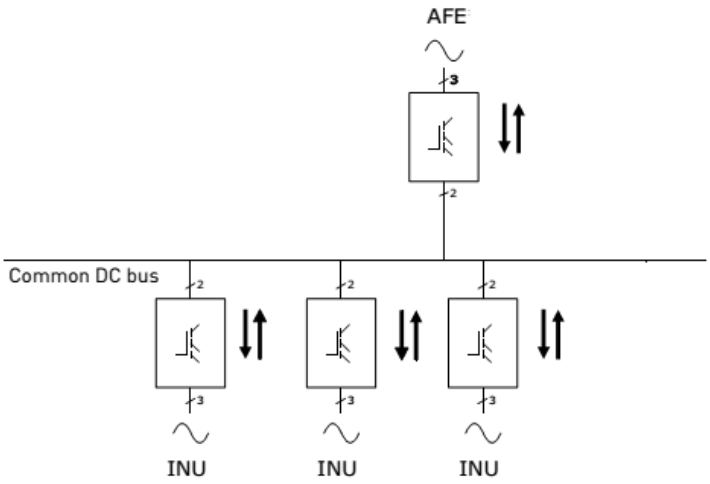


Figura 1.1: Esquema d'un sistema de bus DC. Alimentat a través del rectificador actiu (AFE) i on hi ha connectats difunts inversors (INU).

El rectificador actiu està basat en els rectificadors trifàsics de commutació forçada (*Force-commutated Three-phase Controlled Rectifiers*). Aquest tipus de rectificadors utilitzen semiconductors (requadre verd de la Figura 1.2), que permeten la commutació *ON* i *OFF* tantes vegades per període com es desitgi. D'aquesta manera s'obté un rectificador actiu, és a dir, que no treballa sempre amb el mateix cicle de commutació. El control, que porten tots els AFE, serà l'encarregat d'adequar l'obertura i tancament dels transistors de la manera més adient per mantenir la tensió del bus DC constant.

- La generació de menys harmònics, gràcies a la possibilitat de modular el corrent o la tensió (PWM).
- Es pot corregir el factor de potència.
- Es pot construir com a font de corrent o font de tensió (en aquest cas es farà servir com a font de tensió).

A més dels avantatges esmentats, la utilització de transistors IGBT amb un díode en antiparal·lel (pel qual circularà el corrent en sentit invers), ja que a diferència dels MOSFET, els IGBT no porten un díode paràsit en antiparal·lel. Així doncs, com ja s'ha comentat anteriorment, aquest tipus de rectificador podrà treballar en ambdós sentits: consumint o entregant energia a la xarxa.

1.2. Descripció del rectificador AFE

El principi de funcionament del rectificador AFE és el de mantenir la tensió en el bus DC constant, utilitzant la commutació activa AC/DC. Per aconseguir-ho, el rectificador AFE, mostrat en la Figura 1.2, consisteix en un rectificador PWM (Pulse Width Modulation), que treballa modificant el cicle de commutació per tal de mantenir els paràmetres de referència.

El rectificador és alimentat per una font alterna trifàsica, habitualment la xarxa, i utilitzant un parell de transistors IGBT per fase s'aconsegueix una tensió continua a la sortida (V_D) constant. La V_{REF} és la tensió utilitzada pel sistema de control, per tal de fer la conversió, ja sigui rectificant la tensió des de la xarxa cap al bus DC o a la inversa.

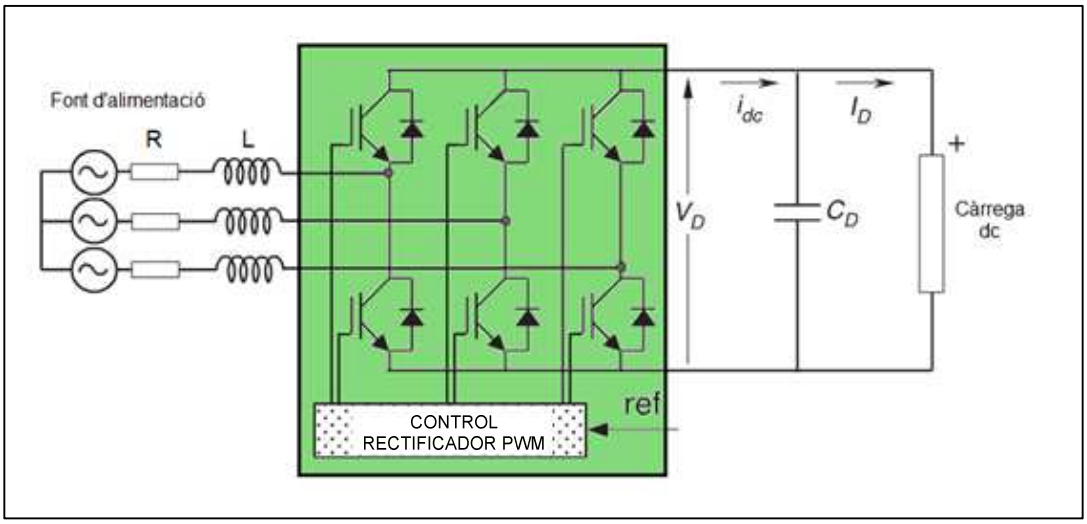


Figura 1.2: Esquema del rectificador trifàsic de commutació forçada.

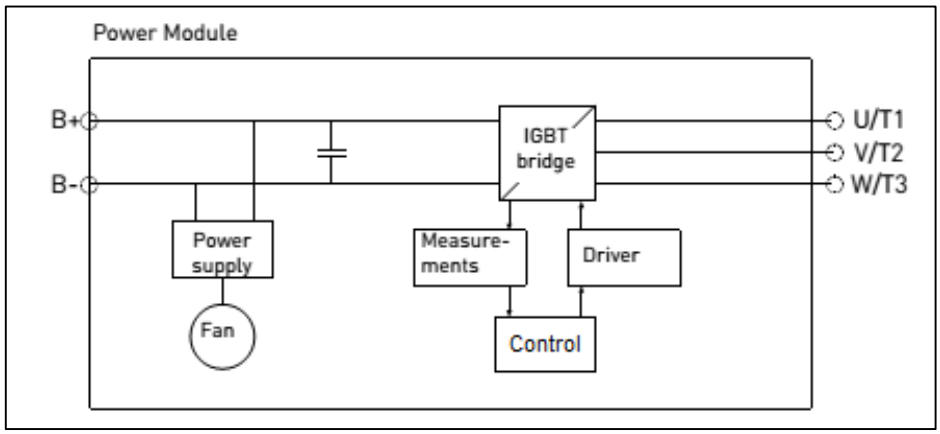


Figura 1.3: Diagrama de blocs del rectificador AFE (Manual de VACON).

A més dels semiconductors IGBTs, els rectificadors actius estan compostos per altres elements, que contribueixen al bon funcionament d'aquest. A més, per poder posar en funcionament el control actiu i l'alimentació del bus DC, és necessari assolir unes condicions de treball especifiques, que proporcionaran alguns d'aquests elements addicionals.

Tot seguit, es farà una breu descripció dels principals elements que conformen el conjunt anomenat AFE i que es poden veure en la Figura 1.4: fusibles AC, filtre LCL, circuit de precàrrega, contactor principal, unitat de control, fusibles DC i bus de corrent continua.

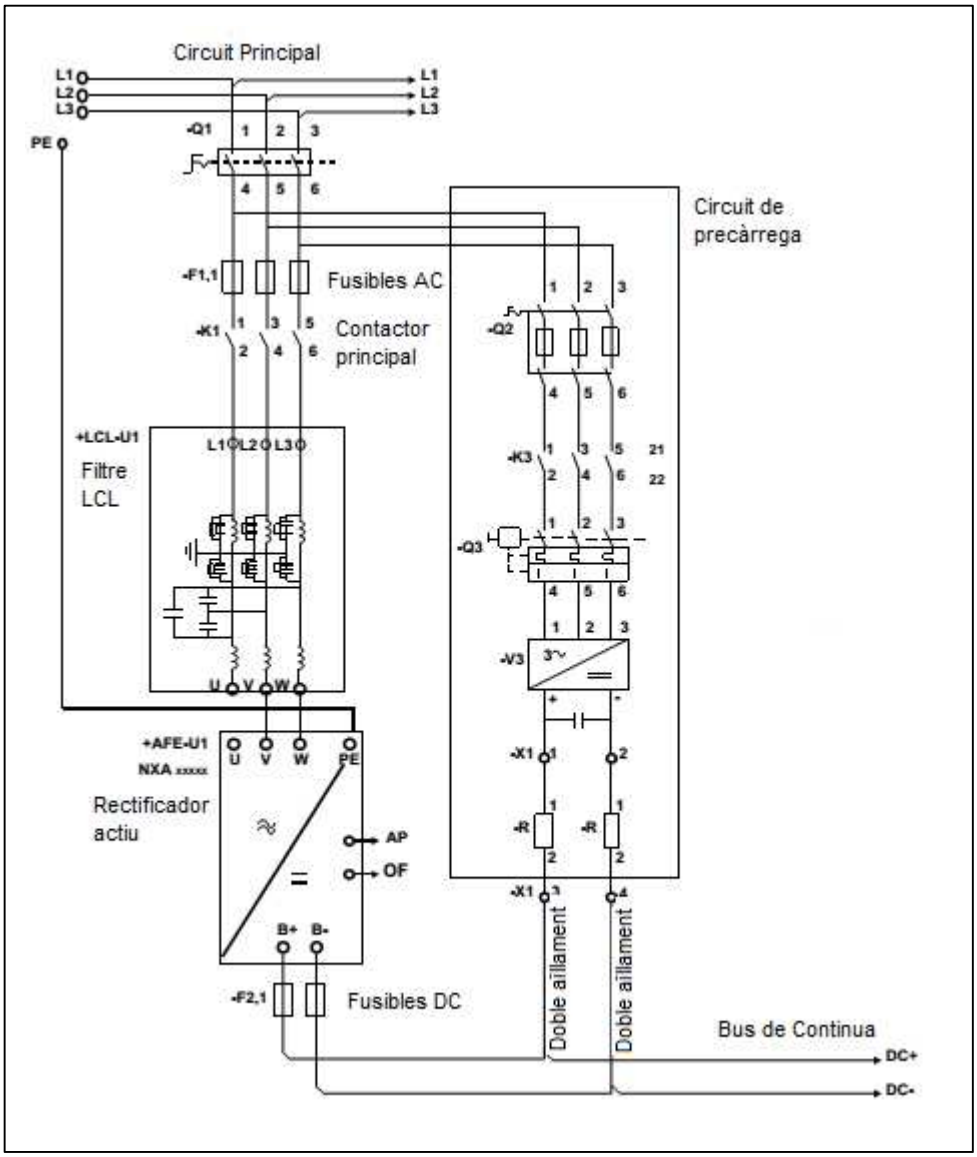


Figura 1.4: Esquema de connexió dels diferents elements que conformen la unitat Active Front End (AFE).

a) Fusibles AC: Els fusibles AC és l'element de seguretat que protegirà la unitat davant sobrecàrregues o curtcircuits en la banda AC.

b) Filtre LCL: El filtre es converteix en un element imprescindible a l'hora de connectar un convertidor actiu a la xarxa. Els rectificadors actius, els quals treballen com un rectificador de commutació forçada (PWM), treballen amb un control en llaç tancat. Això fa que per assegurar un bon funcionament la distorsió total d'harmònics (THD) hagi d'estar per sota del 5%. A més, la introducció d'un filtre LCL permetrà que la instal·lació pugui complir normes com la EN-61000-4-3, referent a la compatibilitat electromagnètica o la IEEE-519, la qual limita el nombre d'harmònics d'un equip connectat en un punt comú de potència.

També es podria solucionar el problema amb l'ús d'inductàncies, tot i que en aplicacions que requereixen potències de varis quilowatts, són una solució cara. Així doncs, els filtres LCL són una opció tècnica i econòmicament òptima.

c) Circuit de precàrrega: La finalitat de la unitat de precàrrega és la de subministrar la tensió necessària a la banda del bus de continua, per poder connectar l'AFE a la font d'alimentació. La unitat Active Front End, segons especifica el fabricant, no ha de ser connectada directament sense el circuit de precàrrega.

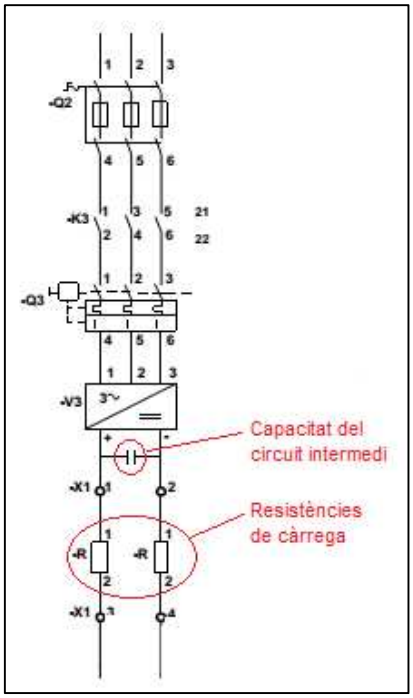


Figura 1.5: Circuit de precàrrega.

En la Figura 1.5 es poden veure els elements de protecció del circuit de precàrrega. Abans del contactor K3 hi ha el Q2, una protecció de fusibles contra les sobreintensitats. Darrera del contactor s'hi troba Q3 un magnetotèrmic, que protegirà el circuit de precàrrega de les sobreintensitats i curtcircuits. A més, s'hi poden veure la capacitat del circuit intermedi i la resistència de càrrega. La capacitat servirà per poder elevar i mantenir la tensió del bus DC. La resistència, tal com diu el seu nom, evitarà el creixement descontrolat de la intensitat durant els períodes de càrrega i descàrrega de la banda de continua.

El temps de càrrega dependrà de la capacitància del circuit intermedi i de les resistències de càrrega.

d) **Contactor principal:** El contactor principal K1 (Figura 1.5) és l'encarregat de connectar el rectificador actiu a la xarxa un cop el sistema ja està a punt, és a dir, ha acabat el període de precàrrega.

e) **Unitat de control:** Aquesta serà la unitat pensant de l'equip i l'encarregada de controlar les commutacions del rectificador, per aconseguir mantenir la tensió en el bus DC constant.

f) **Fusibles DC:** Aquests protegiran la unitat de sobrecàrregues o curtcircuits de la banda de continua.

g) **Bus de corrent continua:** El bus de corrent continua serà l'encarregat de donar tensió als múltiples equips que es vulguin alimentar. Aquest mantindrà una tensió constant i de magnitud superior a la de la font AC.

Finalment, cal dir sobre la fabricació d'aquests equips, que han estat dissenyats segons normativa CE, el que garanteix un correcte funcionament dins de la EEA (European Economic Area). Per tal de distingir-se amb la marca CE, el rectificador AFE de VACON compleix la Directiva de Baix Voltatge (LVD), la Directiva de Compatibilitat Electromagnètica (EMC) i la Directiva SGS FIMKO. El compliment de la Directiva EMC és d'especial importància a nivell tècnic, per tal de que les alteracions produïdes per l'equip siguin el menor possibles. Així mateix, també garanteix que l'equip no es vegi alterat per les pertorbacions externes.

2. Constitució i funcionament del rectificador AFE

En aquest capítol es detallaran els elements que constitueixen el rectificador AFE i les principals característiques d'aquests. Després també s'explicarà la funció de cada un d'aquests elements i el funcionament global del rectificador Active Front End. A més, es mostrarà el control utilitzat per a la rectificació i la sincronització dels senyals amb els senyals de la xarxa.

2.1. Constitució del rectificador AFE

La unitat principal del rectificador AFE i encarregada de fer la conversió AC/DC, són els tres parells de semiconductors IGBTs. Aquests funcionen tal com faria un rectificador PWM (Pulse Width Modulation), tot i que en comptes de funcionar amb un cicle de commutació fixe, té la capacitat de modificar de forma activa el pas de corrent a través dels transistors.

Tot i que els transistors són una part important de l'AFE, aquest no podria funcionar sense alguns elements, que també formen part indispensable del rectificador AFE. Així doncs, a part dels transistors IGBT els elements que formen part del conjunt AFE són: el filtre LCL, el circuit de precàrrega i el bus DC. A continuació es descriuran amb més detall els elements esmentats.

2.1.1. Rectificador

El rectificador utilitzat en la tipologia Active Front End és el rectificador trifàsic de commutació forçada. Aquests tipus de rectificadors utilitza semiconductors, els

quals tenen la capacitat de tancar-se. Aquesta capacitat permet el control total del rectificador, ja que d'aquesta manera els interruptors es poden obrir i tancar quan sigui necessari. Això permet commutar els interruptors centenars de vegades en un període, cosa que no és possible en els rectificadors de tiristors, en els que el tancament o commutació de ON a OF només es fa una vegada per cicle.

Els rectificadors de commutació forçada presenten els següents avantatges:

- El corrent o la tensió poden ser modulades (PWM), generant menys contaminació per harmònics.
- El factor de potència pot ser controlat i fins i tot aconseguir que aquest sigui 1.
- Pot ser fabricat com a font de tensió o de corrent.
- La inversió de potència en els rectificadors de tiristors s'aconsegueix invertint el signe de la tensió del bus DC, cosa que no succeeix en els PWM.

En la Figura 2.1 es pot veure l'estructura bàsica del rectificador de voltatge PWM. A més d'un parell de transistors per fase, es pot veure com entre els transistors i la font AC existeix un filtre, en el cas estudiat consisteix en un filtre LCL. En la banda de continua també hi ha un condensador o bateria de condensadors. Finalment també hi ha un mòdul de control (PWM SIGNALS), el qual controlarà la commutació dels interruptors IGBT.

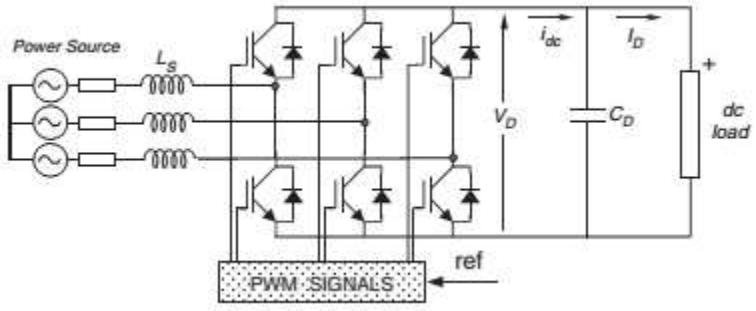


Figura 2.1: Principi de funcionament del rectificador de voltatge PWM.

2.1.2. Filtre LCL

El filtre LCL és un element passiu que està col·locat entre els transistors IGBT i la font d'alimentació AC. Aquest element és indispensable per poder connectar la unitat AFE a una font de tensió AC, que habitualment és compartida amb altres usuaris, equips, màquines, etc.

El filtre LCL treballa bidireccionalment, és a dir, tant quan el rectificador està consumint potència com quan en retorna al a font AC. Les funcions del filtre LCL són, essencialment dues:

- Eliminar els harmònics d'alta freqüència deguts a les commutacions PWM del convertidor, per tal d'aconseguir que els corrents injectats a la xarxa siguin el més sinusoïdals possibles.
- Col·locar una impedància entre dues fonts de tensió, com són la unitat Acive Front End i la xarxa elèctrica (AFE). Si es connectés directament la unitat AFE a la xarxa es produiria un curtcircuit.

Per poder treballar correctament amb un rectificador (PWM) en llaç tancat, és convenient tenir un corrent d'entrada, amb un nivell de distorsió total d'harmònics (THD) inferior al 5%. Tot i això, la freqüència de commutació típica dels dispositius de potència, com és el cas del rectificador actiu, es troba entre 5-15 kHz, el que pot originar pèrdues significatives. A més, l'estàndard europeu IEC/EN 61000-3-2 regula el nivell d'harmònics que es poden injectar a la xarxa, per tal de no perjudicar la qualitat de la xarxa elèctrica. Així doncs, per tal de mantenir la qualitat de la font principal AC, que alimenta l'AFE, ja sigui la xarxa o font particular, és necessària la instal·lació d'un filtre entre la unitat AFE i la font AC.

Per aconseguir reduir el nivell d'harmònics al voltant de les freqüències de commutació es poden utilitzar filtres L (inductius). Tot i això, en aplicacions que requereixen potències que superen l'ordre del kilowatt, resulten una solució cara, ja que requereixen inductàncies de valors elevats. A més, la resposta dinàmica del sistema resulta bastant pobre.

Una alternativa a aquest problema és el, ja esmentat, filtre LCL. La connexió d'un filtre LCL (Figura 2.2), permet obtenir resultats òptims en sistemes de potència que superen el centenar de KVA. El filtre L és un filtre de primer ordre, per tant, la freqüència de commutació del convertidor ha de ser alta per poder atenuar els harmònics causats en la PWM i fer servir inductàncies de valor elevat. El filtre LCL és un filtre de tercer ordre, pel que es poden aconseguir majors atenuacions treballant a la freqüència de commutació amb la mateixa inductància equivalent. Tot i això, els filtre LCL tenen una complicació més elevada pel que fa al seu disseny i algorisme de control, per compensar les pertorbacions.

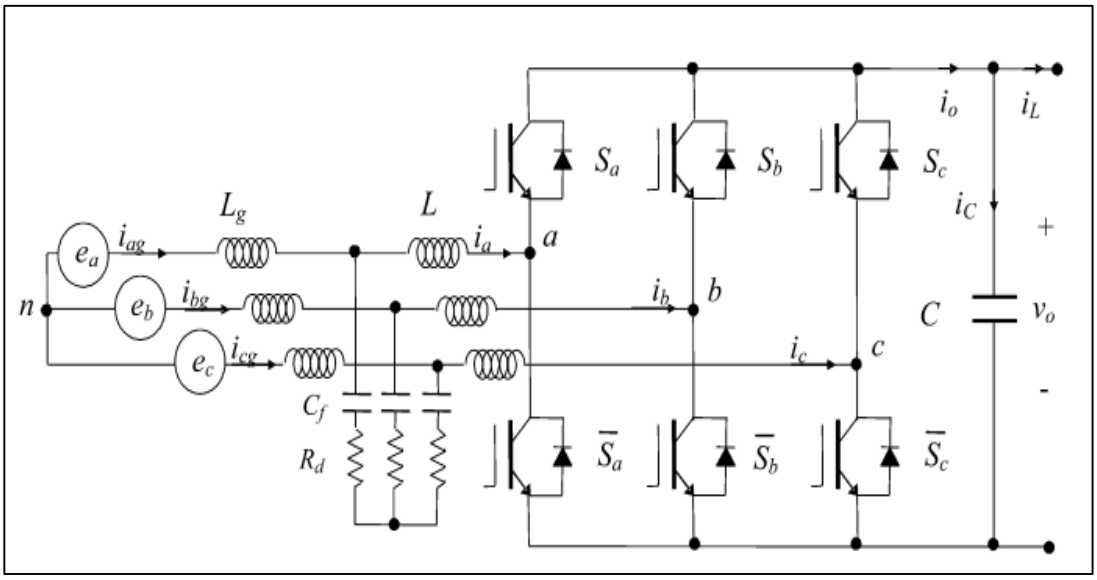


Figura 2.2: Rectificador actiu trifàsic connectat a una font trifàsica AC a través d'un filtre LCL.

Per altra banda, existeix el problema de les interferències electromagnètiques (EMI), per a les que s'ha d'utilitzar filtres específics, quan es treballa per sobre dels 150kHz i potències menors. Així doncs, les mateixes inductàncies usades en el filtre LCL poden servir per reduir les interferències electromagnètiques (usant nuclis magnètics, per exemple). Tot i això, el problema de les EMI és complex, ja que requereixen de filtres especialment dissenyats en funció del rang de freqüències en el que treballa. Així doncs, cal considerar el rang de freqüències pel qual ha estat dissenyat el filtre, a l'hora de connectar-hi un convertidor i considerar a quin rang de commutació treballa aquest.

2.1.3. Circuit de precàrrega

Una altra part imprescindible en el funcionament de la unitat Active Front End (AFE) és el circuit de precàrrega. Abans de poder posar en funcionament el rectificador, és a dir d'iniciar la commutació dels transistors per a la conversió AC/DC, és necessari haver assolit el nivell de tensió de referència en la banda de continua i haver donat tensió a tots els elements que conformen el mòdul de control. Així doncs, per aconseguir la càrrega de la bateria de condensadors i la correcta alimentació de sistema de control existeix l'anomenat circuit de precàrrega.

En el manual del fabricant aconsellen explícitament, que no s'hauria de connectar la unitat AFE directament a una font de potència. Per tal de que no es pugui connectar l'AFE de forma directa, sense la corresponent precàrrega, existeix un

contactor principal (K1). El control d'aquest contactor està monitoritzat pel mateix AFE, de tal manera, que és la mateixa unitat de control que controla el rectificador el que determina la obertura del contactor principal. En la figura 2.3 es mostra l'esquema de connexió, del circuit de precàrrega, del circuit de control.

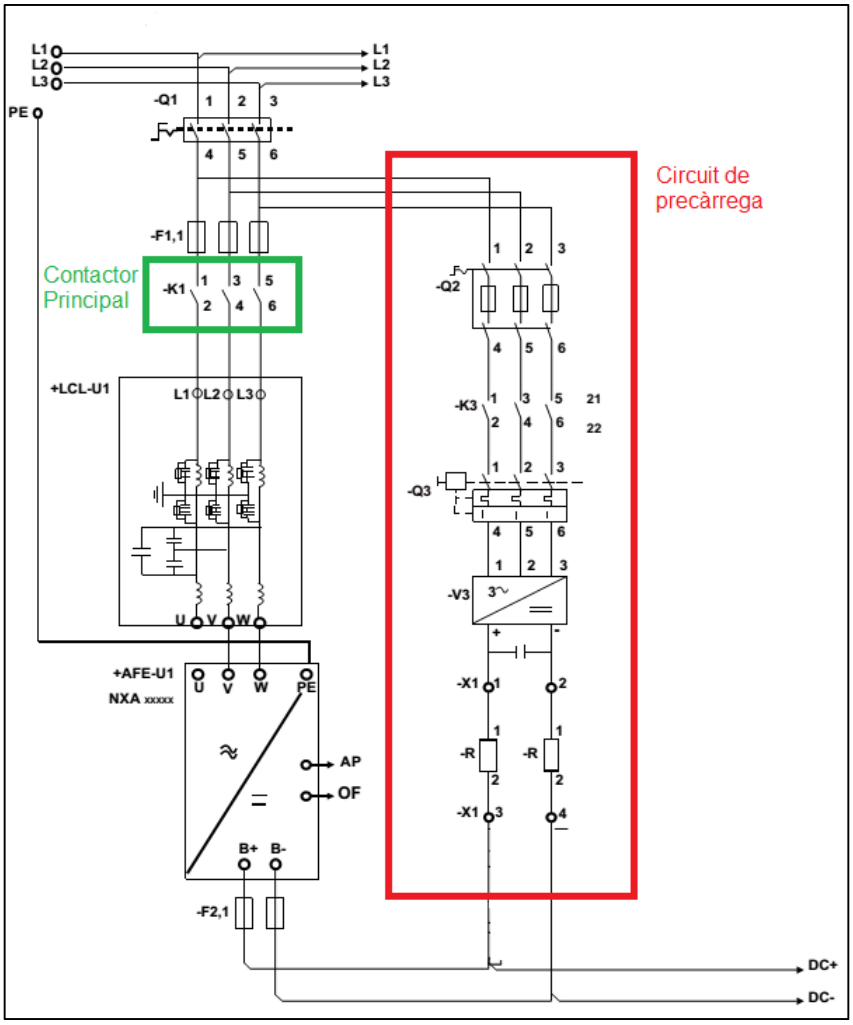


Figura 2.3: Esquema de connexió on es poden veure el contactor principal, K1, i el circuit de precàrrega.

2.1.4. Bus de continua

En els convertidors Front End són els convertidors els quals a partir d'una font d'alimentació (Front), en el cas de l'AFE una font AC, subministra potència a altres aparells a través d'un bus de corrent continua (End). Així doncs, aquest bus dc serà l'encarregat de donar tensió i subministrar potència a tot tipus d'aparells elèctrics: motors, fonts d'energies renovables (plaques solar fotovoltaiques, aerogeneradors, etc.), etc. El principal avantatge d'utilitzar un bus comú per

l'alimentació de diferents equips és la recuperació de l'energia. Els equips connectats al bus dc utilitzen una mateixa font amb una tensió comuna. Així doncs, els equips poden treballar tant consumint com aportant potència al bus d'alimentació de corrent continua i per tant fer possible l'intercanvi d'energia entre els diferents equips. A més, tal com ja s'ha introduït prèviament, el rectificador AFE permet treballar en ambdós sentits i per tant en el cas d'existir energia sobrant en el sistema es pot retornar a la font d'alimentació AC.

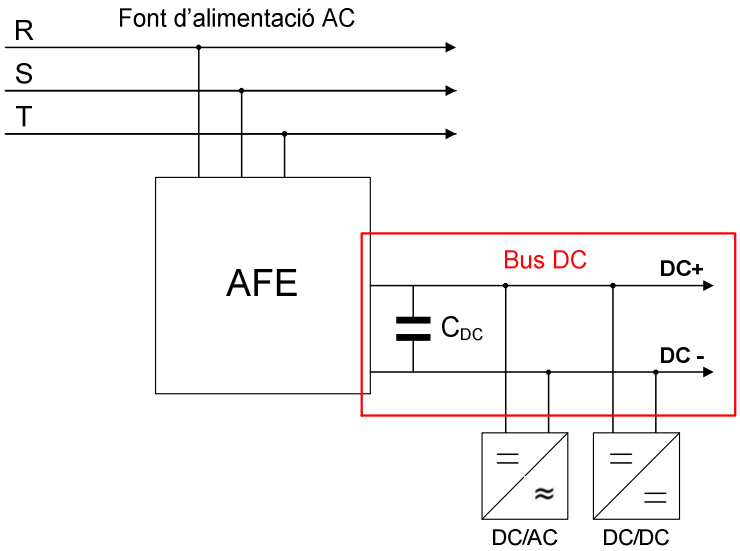


Figura 2.4: Esquema general del bus de continua alimentant tant dispositius DC/AC com DC/DC.

El bus DC treballa a una tensió superior a la d'alimentació de la font AC. Segons especificacions del fabricant, la tensió de el bus de continua hauria de ser de 1.35 vegades superior a la tensió d'entrada (V_{AC}). A més, a la taula 4 del manual de l'AFE diu que la tensió rectificada en el bus dc per defecte és del 110%. Per tant, si es considera que la font AC és la xarxa en condicions ideals, la tensió d'entrada serà de 230/400V. Ara si es considera que s'alimenta el rectificador AFE utilitzant la xarxa com a font trifàsica (L1, L2, L3) i per tant es considera la tensió AC d'entrada de 400V, es pot calcular la tensió en el bus de contínua com:

$$V_{DC} = 1{,}35 \cdot 400 \cdot 1{,}1 = 594V \qquad \text{(Eq. 2.1)}$$

A la Figura 2.4 també es pot veure, que a part dels propis conductors del bus de continua (DC+ i DC-), també hi ha una capacitat (C_{DC}). Aquesta capacitat té dues finalitats:

a) Atenuar el rissat de la tensió generada pel convertidor.

b) Augmentar la tensió fins a la tensió de referència utilitzada per la unitat Active Front End.

Per aconseguir reduir el rissat i augmentar la tensió s'utilitza una bateria de condensadors, fent servir una combinació de condensadors en sèrie i en paral·lel (Figura 2.5). A més de la capacitància, és necessari col·locar-hi una resistència per evitar que els condensadors puguin quedar carregats i per no crear un curtcircuit, en el cas de connectar-hi un inversor. $V_{DC}+$

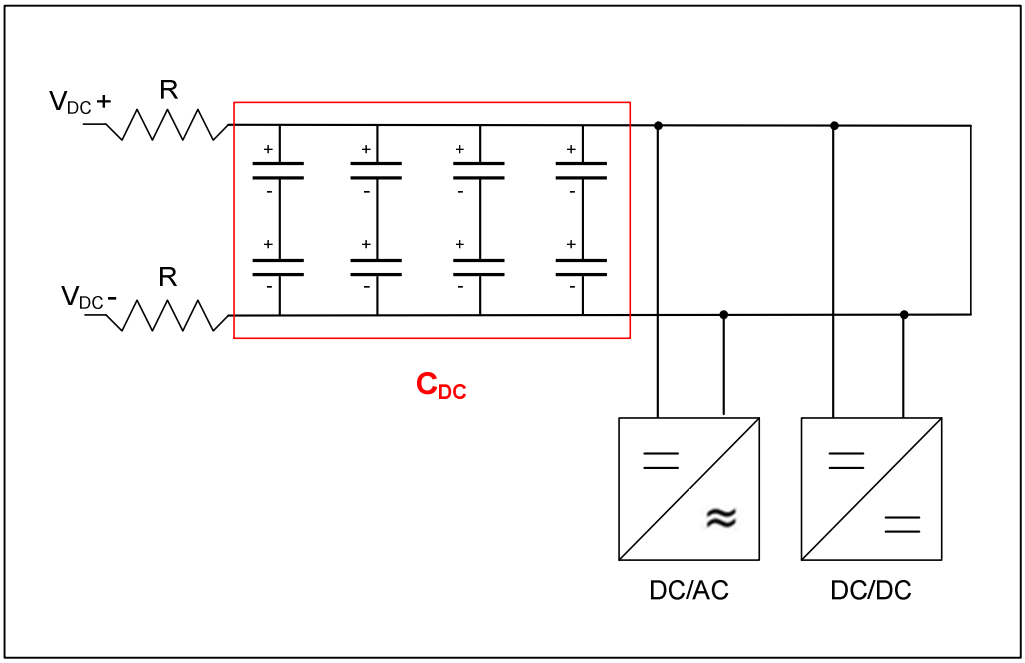


Figura 2.5: Esquema del bus de continua amb la bateria de condensadors.

Model	Resistència	Capacitat	
		mínima	màxima
FI9	2 x 47Ω	4950 µF	30000 µF
FI10	2 x 20Ω	9900 µF	70000 µF
FI11	2 x 11Ω	29700 µF	128000 µF

Taula 2.1: Valors mínims i màxims de la capacitància del bus DC.

El temps de precàrrega dependrà de la capacitància i resistències instal·lades en el bus DC (Taula 2.1). A continuació es calcula el temps que es necessitaria per carregar la bateria de condensadors, considerant el model FI9. La unitat escollida

és de la família Vacon NXA 5, el qual té una tensió nominal en el bus de contínua entre 465-800 V_{DC} (segons el manual de l'equip AFE).

Anteriorment s'ha calculat que la tensió en el bus DC serà aproximadament de 594V (Eq. 2.1). Així doncs, pels càlculs s'ha considerat una resistència de 47Ω, una capacitat de 4950µF i una tensió de 600V_{DC} (Figura 2.6).

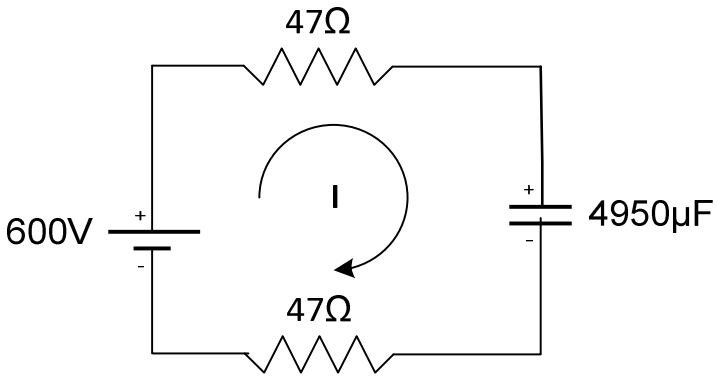


Figura 2.6: Esquema de càlcul utilitzat pel bus de DC.

Primer cal saber la impedància total del circuit:

$$R_t = 2 \cdot R = 2 \cdot 47 = 94\ \Omega \quad \text{(Eq. 2.2)}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4950 \cdot 10^{-6}} = 0{,}643\ \Omega \quad \text{(Eq. 2.3)}$$

$$Z = 94 - 0{,}643i\ \Omega \quad \text{(Eq. 2.4)}$$

A continuació, ja es pot calcular el corrent:

$$I = \frac{600}{94 - 0{,}643i} = 6{,}38 + 4{,}37i\ A \quad \text{(Eq. 2.5)}$$

Per poder utilitzar l'equació que estableix el temps de càrrega del condensador:

$$Q = C \cdot V_C = Q_{màx}\left[1 - e^{-t/(RC)}\right] = C \cdot V_{total}\left[1 - e^{-t/(RC)}\right] \quad \text{(Eq. 2.6)}$$

Així cal calcular la tensió en el condensador:

$$V_C = I \cdot X_C = (6{,}38 + 4{,}37i) \cdot (-0{,}643i) = 2{,}81 - 4{,}1i\ V \quad \text{(Eq. 2.7)}$$

Ara, ja es pot substituir en l'equació 2.6:

$$4950 \cdot 10^{-6} \cdot (2{,}81 - 4{,}1i) = 4950 \cdot 10^{-6} \cdot 600\left[1 - e^{-t/(94 \cdot 4950 \cdot 10^{-6})}\right] \quad \text{(Eq. 2.8)}$$

I si s'aïlla el temps de l'equació 2.8, s'obté, que el temps de càrrega del bus DC és de:

$$\boldsymbol{t} = -RC \cdot \left(1 - \frac{Q}{Q_{màx}}\right) = -0{,}4653 \cdot ln\left(1 - \frac{2{,}46 \cdot 10^{-2}}{2{,}97}\right) = 3{,}87 \cdot 10^{-3}\ s \quad \text{(Eq. 2.8)}$$

Per tant, el temps de càrrega d'aquest circuit estaria per sota dels 4 ms, un temps que pot semblar insignificant, però necessari per la connexió del rectificador Active Front End.

2.2. Funcionament

En aquest apartat s'explicarà el funcionament del rectificador AFE, començant per l'estratègia de funcionament, en la que es plantejarà les situacions de treball en les que pot funcionar el rectificador AFE, S'explicaran els modes de funcionament del rectificador i en quina direcció funcionen les tensions i corrents en cada situació de treball.

Després s'introduirà el sistema de sincronització dels senyals del rectificador amb els de la font d'alimentació i la caracterització de la tensió de xarxa, per poder-ne fer un seguiment i treballar en llaç tancat.

2.1.1. Estratègia de funcionament

La premissa de funcionament del rectificador actiu és la de mantenir constant la tensió del bus de continua i treballant sempre de forma sincronitzada amb la tensió de la font AC. D'aquesta manera es plantegen diferents condicions de treball en funció dels nivells de tensió i corrent demandats per la càrrega. A continuació es descriuran els dos modes de funcionament del rectificador AFE:

a) **Funcionant com a rectificador:** quan el corrent I_D (Figura 2.7) és positiu, el condensador C_D es troba descarregat, per tant el sistema de control

interpreta la senyal d'error com una demanda de més potència provinent de la font d'alimentació AC. D'aquesta manera la unitat de control ha de generar la corresponent modulació dels semiconductors, per tal de subministrar la potència necessària al bus DC. Així s'aconsegueix alimentar el condensador, fent circular el corrent des de la font AC cap a la càrrega DC, carregant al mateix temps el condensador (C_D) i recuperant la tensió de referència en aquest.

b) **Funcionant com a inversor:** quan el corrent I_D és negatiu (va en sentit invers al cas "a"), el condensador C_D està sobrecarregat i la unitat de control interpreta la senyal d'error com la necessitat de descarregar el condensador. Per tant, commuta els transistors de tal manera que la potència pugui fluir des del bus DC cap a la font AC.

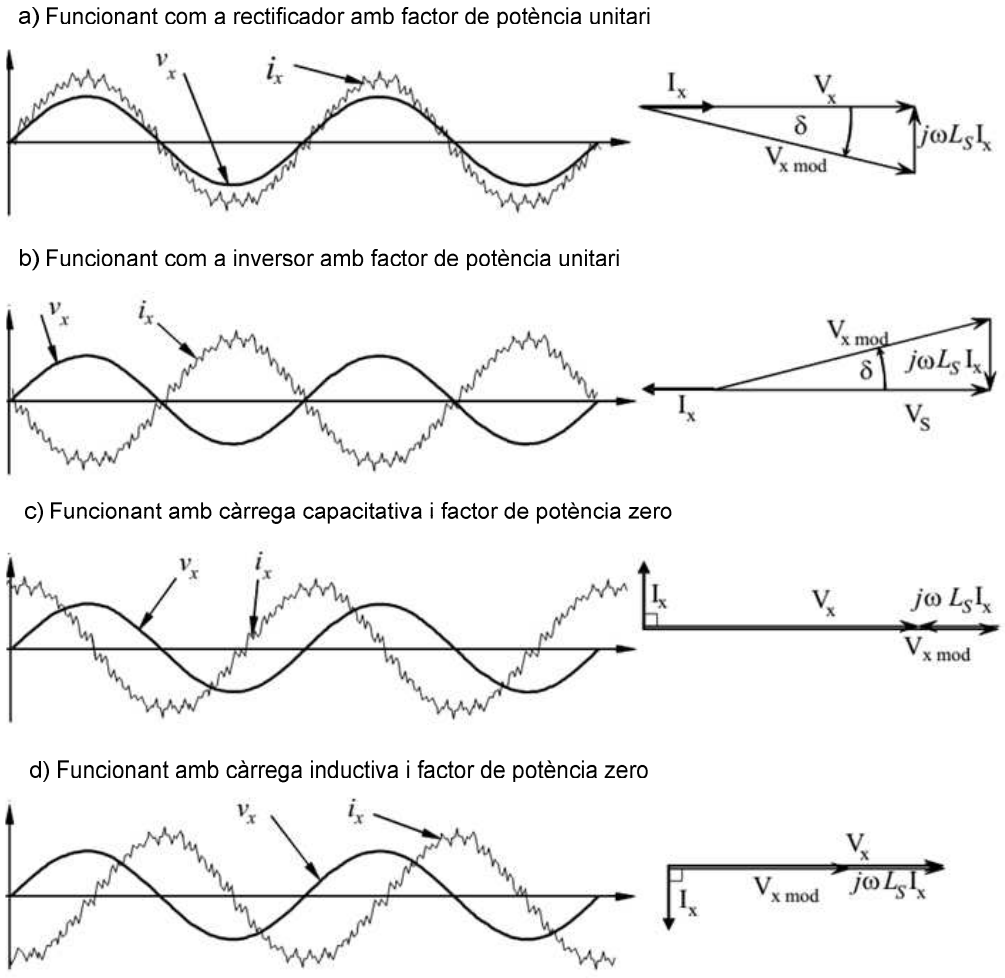


Figura 2.7: Diagrames fasorials del rectificador de commutació forçada treballant en els quatre quadrants.

A més, de poder treballar bidireccionalment també ho pot fer amb tot tipus de càrregues, perquè com ja s'ha comentat el rectificador actiu pot modificar el període de commutació per aconseguir corregir el factor de potència. Així doncs si es consideren totes les possibilitats en que pot treballar el rectificador AFE, es diu que pot treballar en els quatre quadrants (Figura 2.7).

El corrent I_x de la figura 2.7 és el corrent eficaç (I_{rms}) del corrent de la font i_x. Aquest corrent és el corrent que flueix a través dels semiconductors de la Figura 2.8. Durant la meitat positiva del cicle, el transistor T_N, connectat al costat negatiu del bus DC és contat a la posició ON, i el corrent i_x circula a través de T_N (i_{TN}). El corrent retorna a la font principal a través del transistor T_p, tancant el llaç amb una altra fase, al mateix temps que passa a través del díode connectat al mateix terminal negatiu del bus DC. Quan aquest corrent passa a través de la càrrega es diu que està en inversió.

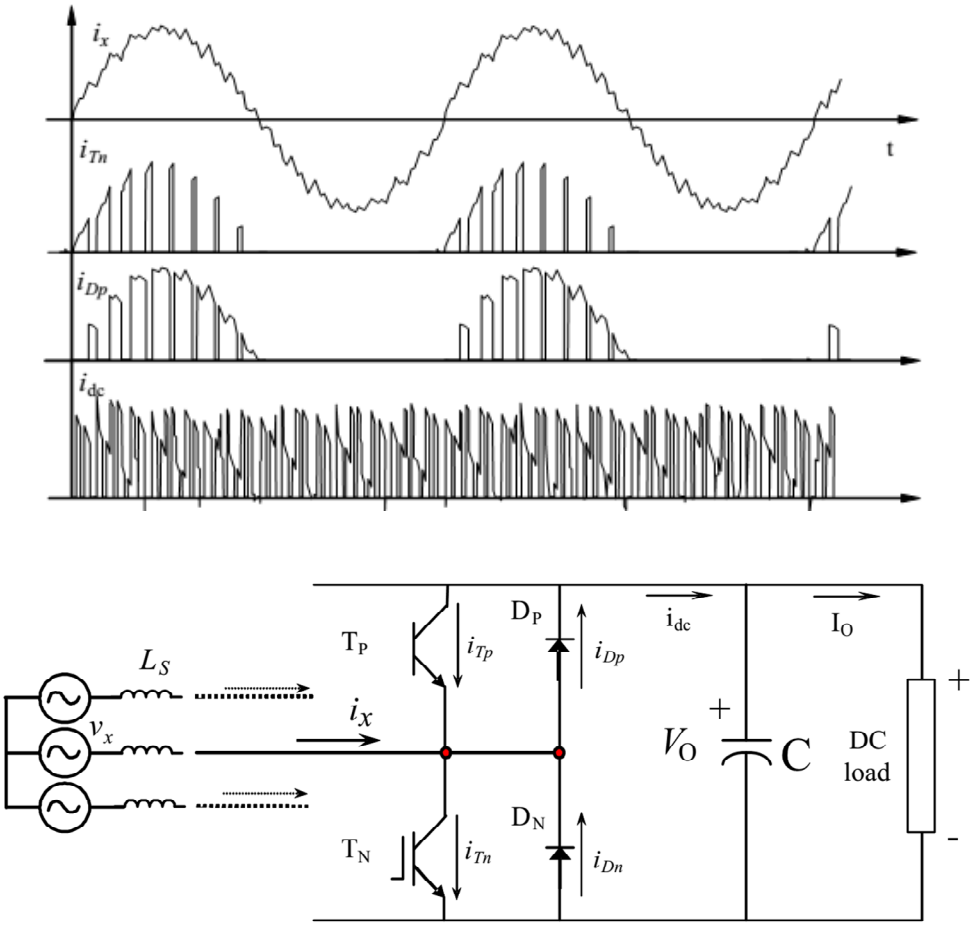


Figura 2.8: Corrents de la font AC, dels transistor (T_N), del díode (D_p) i en el bus DC.

2.1.2. Caracterització de la tensió AC

Per utilitzar la xarxa elèctrica com a font principal AC, cal que la tensió AC del convertidor sigui el més sinusoïdal possible, per evitar les pertorbacions creades pels harmònics, i que el corrent estigui en fase amb la tensió AC, per aproximar el factor de potència a 1. Per això és important que el convertidor tingui un control capaç de sincronitzar el convertidor amb la xarxa el més ràpid possible.

El sistema de control estudiat en aquest projecte és el control de fase en llaç tancat PLL (Phase Locked Loop). Alguns dels avantatges que permet aquest tipus de control en unitats regeneratives són:

- Una sincronització exacta del controlador amb la fase de la tensió de xarxa.
- Control de potència
- Separació de la seqüència positiva i negativa de la xarxa.
- Ràpida resposta davant pertorbacions.
- Sincronització amb la fonamental.

La utilització del control PLL requereix d'una òptima caracterització de la tensió de la xarxa, ja que per tal de que funcioni correctament necessita conèixer el mòdul i la fase de la fonamental de la xarxa. Per caracteritzar la tensió de la xarxa elèctrica s'utilitza la seqüència positiva i s'utilitza la representació d'aquesta en els eixos dq. Tot seguit es presenta la representació matemàtica utilitzada per la modelització de la tensió de la xarxa.

Les tensions de fase de la xarxa es poden representar com el sumatori de totes les components harmòniques que les composen:

$$\vec{V}_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\vec{V}_{abc}^{+n} + \vec{V}_{abc}^{-n} + \vec{V}_{abc}^{0n} \right) \quad \text{(Eq. 2.9)}$$

on els superíndexs +n, -n, 0n fan referència a les components de les seqüències positiva, negativa i homopolar respectivament. Ara si sabem que el desfasament entre les tensions de fase és de 2π/3, és a dir es poden expressar com:

$$V_a(t) = \mathrm{V} \cdot \cos(\theta) \quad \text{(Eq. 2.10)}$$

$$V_b(t) = \mathrm{V} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{(Eq. 2.11)}$$

$$V_c(t) = \mathrm{V} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{(Eq. 2.12)}$$

També podem expressar les tensions de seqüència positiva, negativa i homopolar de la següent manera:

$$\vec{V}_{abc}^{+n} = V^{+n}\begin{bmatrix}\cos(n\omega t + \theta^{+n})\\ \cos\left(n\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta^{+n}\right)\\ \cos\left(n\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta^{+n}\right)\end{bmatrix} \quad \text{(Eq. 2.13)}$$

$$\vec{V}_{abc}^{-n} = V^{-n}\begin{bmatrix}\cos(n\omega t + \theta^{-n})\\ \cos\left(n\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta^{-n}\right)\\ \cos\left(n\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta^{-n}\right)\end{bmatrix} \quad \text{(Eq. 2.14)}$$

$$\vec{V}_{abc}^{0n} = V^{0n}\begin{bmatrix}\cos(n\omega t + \theta^{0n})\\ \cos(n\omega t + \theta^{0n})\\ \cos(n\omega t + \theta^{0n})\end{bmatrix} \quad \text{(Eq. 2.15)}$$

Ara si es considera que s'està treballant amb un sistema trifàsic, com és la xarxa en condicions ideals, es poden fer algunes simplificacions. En primer lloc, es treballarà únicament amb les tensions positives i negatives, ja que en un sistema trifàsic equilibrat la tensió homopolar és nul·la. En segon lloc, només es considerarà la fonamental i una component harmònica (positiva o negativa) en cada fase. Finalment, es considerarà que l'angle característic de la component harmònica és zero. Així doncs, la tensió de la xarxa es pot expressar com:

$$\vec{V}_{abc} = V^{+1}\begin{bmatrix}\cos(\omega t)\\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\end{bmatrix} + V^{n}\begin{bmatrix}\cos(n\omega t)\\ \cos\left(n\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\\ \cos\left(n\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\end{bmatrix} \quad \text{(Eq. 2.15)}$$

on V^{+1} és la component fonamental i V n és la component harmònica considerada (n>0 seqüència positiva i n<0 seqüència negativa).

Per expressar la tensió en el sistema síncron dq s'aplicarà la transformada de Park, a la tensió de xarxa simplificada (Eq. 2.15).

$$[T_{Park}] = \begin{bmatrix}\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\\ \cos(\theta') & \cos(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta' + \frac{2\pi}{3})\\ -\sin(\theta') & -\sin(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta' + \frac{2\pi}{3})\end{bmatrix} \quad \text{(Eq. 2.15)}$$

on θ' és l'angle fixat pel sistema de referència síncron.

$$\vec{V}_{abc} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = [T_{Park}] \cdot \vec{V}_{abc} = V^{+1} \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta') \\ \sin(\omega t - \theta') \end{bmatrix} + V^{n} \begin{bmatrix} \cos(n\omega t - \theta') \\ \sin(n\omega t - \theta') \end{bmatrix} \quad \text{(Eq. 2.16)}$$

Aquest model basat en un sistema de referència dq rotatiu síncron, permet el càlcul del mòdul i la fase de la tensió AC, per poder aplicar un algoritme de control lineal.

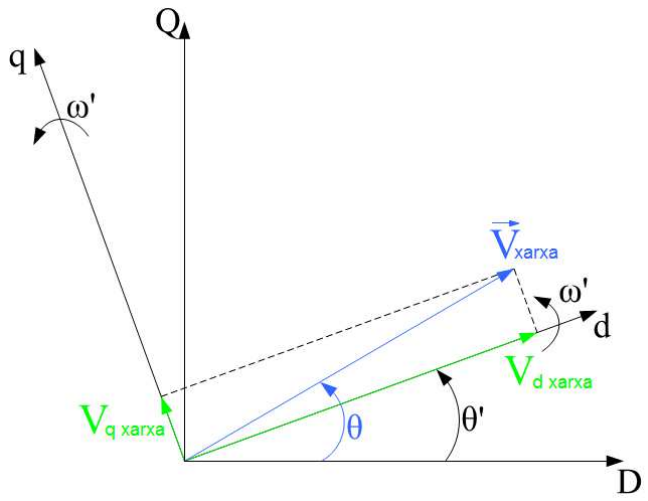


Figura 2.9: Diagrama fasorial de la tensió de la xarxa en els eixos estacionaris D-Q (blau) i en el sistema de referència síncron d-q girant a la freqüència de la xarxa (50Hz).

2.1.3. Control Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop (SRF-PLL)

El mètode Synchronous Reference Frame transforma el sistema de referència estacionari abc als eixos dq, els quals coincideixen amb els de la tensió de xarxa com s'ha explicat en l'apartat anterior. El principal avantatge, de transformar la tensió del sistema de referència abc al dq, és que la senyal de tensió sinusoïdal genera un senyal continu i lineal en els eixos dq, en el que es pot avaluar el mòdul i l'angle de la tensió alterna per separat i de forma simplificada.

La Figura 2.10 mostra el diagrama del llaç de control plantejat. A l'entrada del sistema es tenen les tres fases de la tensió de xarxa (V_a, V_b, V_c) . A continuació es

fa la conversió al sistema de referència estàtic D-Q i tot seguit al sistema de referència síncron (girant a la freqüència de la xarxa) d-q. Després, com que la component de quadratura (q) és una constant, s'utilitza un controlador PI com a filtre passa baixos i obtenir la freqüència de la tensió de xarxa (ω'). Finalment s'integra per obtenir l'angle de la tensió d'entrada, que és utilitzat pel controlador, que treballa utilitzant el synchronous reference frame control.

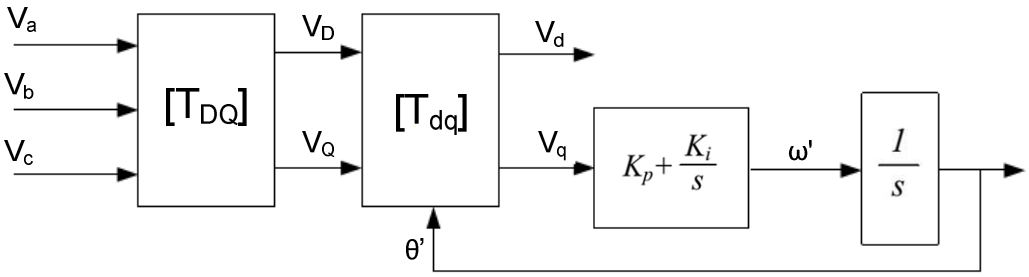


Figura 2.10: Diagrama de blocs d'un sistema de referència síncron de fase en llaç tancat (PLL).

El funcionament del sistema de referència síncron (SRF-PLL) consisteix en corregir la tensió del convertidor, perquè aquesta sigui el més semblant en mòdul i angle a la de la xarxa. Per aconseguir-ho utilitza un controlador PI, que modifica la V_Q, utilitzant l'error obtingut de la comparació entre l'angle de sortida i el de la tensió de la xarxa elèctrica.

La finalitat SRF-PLL és la d'aconseguir, que la component projectada en l'eix de quadratura (Q) sigui zero i que la projecció sobre l'eix directe (D) sigui igual a la de la xarxa, en mòdul i fase. D'aquesta manera s'anul·la l'energia reactiva i es minimitza la potència activa, aconseguint així un factor de potència unitari.

3. Inversor DC/AC

En aquest capítol s'explicaran de forma general les funcions de l'inversor. A més, es posarà de manifest la importància d'aquest equip, quan s'utilitza un rectificador AFE. Després es descriuran les parts que el formen i finalment es detallarà la connexió d'aquest amb el rectificador AFE:

3.1. Introducció

L'inversor DC/AC és un element imprescindible per a la connexió d'equips que requereixen una font alterna. Tot i que a la pràctica es poden utilitzar per ala connexió de qualsevol aparell elèctric que funcioni amb una font alterna, la principal funció dels inversors és la d'alimentació i control de motors AC. Cada vegada és més freqüent la utilització d'inversors DC/AC o també anomenats variadors de freqüència, per a l'alimentació controlada de motors AC.

3.2. Descripció i funcionament

L'inversor utilitzat en aquest projecte ha de ser capaç de poder treballar d'acord amb les especificacions del rectificador AFE, per tal d'aprofitar els avantatges d'aquest tipus de rectificador. A més de permetre el control d'un motor d'inducció com el que s'utilitza en aquest projecte. Així doncs, l'inversor utilitzat és del tipus anomenat *voltage source inverter* (VSI). Aquest tipus d'inversors treballen amb un condensador connectat en paral·lel en la banda d'alimentació DC.

Els inversors VSI poden treballar de forma autònoma o connectats a un bus o xarxa. En aquest cas, com ja s'ha esmentat, ha de poder treballar conjuntament amb el rectificador AFE i per tant poder-se connectar al bus comú de tensió continua. Dins d'aquesta categoria s'ha escollit un inversor del tipus *self-commutated inverter*, el qual treballa utilitzant la commutació PWM. Els inversors *self-commutated inverter* utilitzen transistors bipolars IGBTs, per ala commutació

DC/AC. D'aquesta manera pot funcionar de forma inversa al rectificador AFE i commutar de forma bidireccional des del bus DC al motor o des del motor al bus DC.

L'estructura física de l'inversor està formada per dos unitats, la unitat de potència i la unitat de control:

1. **La unitat de potència** conté un pont inversor format pels transistors IGBTs. Aquest transformarà la tensió DC en una tensió trifàsica (PWM) equilibrada per alimentar el motor. Per protegir els condensadors del bus DC la unitat de potència també conté un circuit de precàrrega, que controla el procés de càrrega d'aquests condensadors.

2. **La unitat de control:** és encarregada del control del motor i de l'inversor està controlada per un microprocessador. El microprocessador controla el motor basant-se en la informació que rep a través de les mesures, la configuració dels paràmetres, les entrades i sortides de control i la caràtula de control. El bloc de control de l'inversor i del motor consisteixen en un control ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*), el qual controla la commutació dels transistors IGBT i per tant la conversió DC/AC.

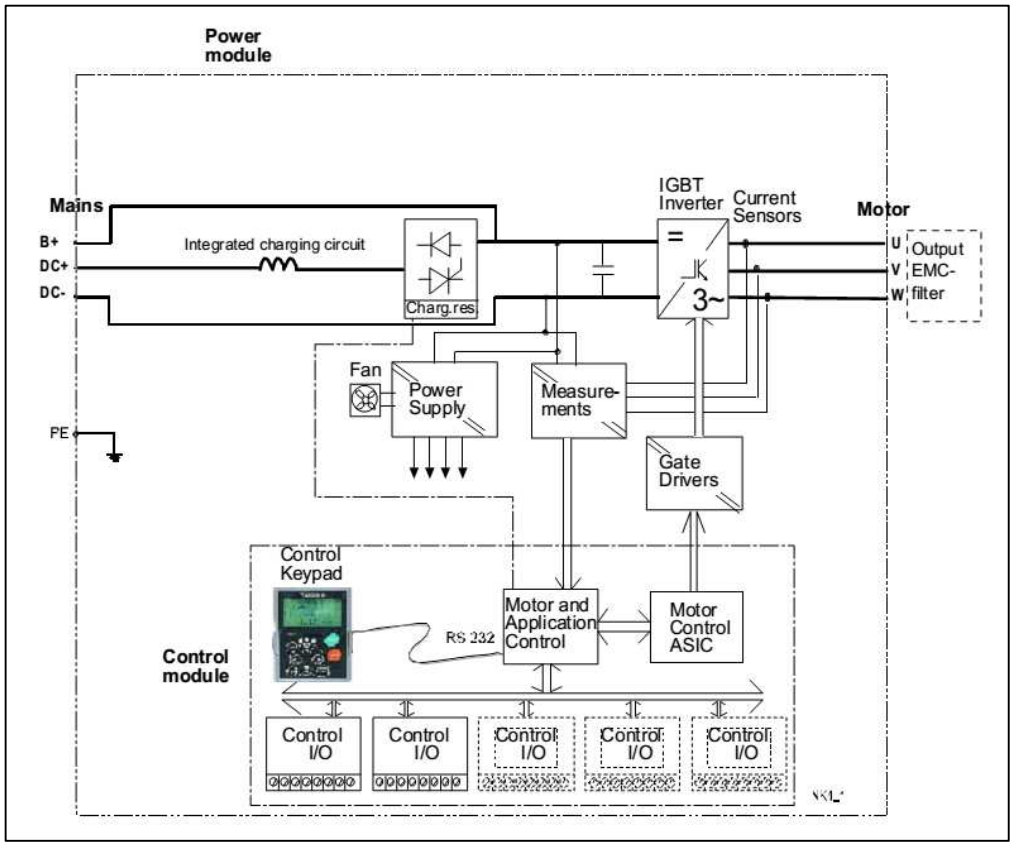


Figura 3.1: Diagrama de blocs de l'inversor NX de VACON.

3.3. Connexió amb el rectificador AFE

L'inversor, com diu el seu nom, funciona de forma inversa al rectificador AFE. Així doncs, s'alimenta a través d'una font de tensió alterna i proporciona una tensió trifàsica equilibrada.

En la Figura 3.2 es mostra l'esquema del muntatge estudiat en aquest projecte, format pel rectificador AFE, l'inversor i el motor. La connexió de l'inversor amb el rectificador AFE es realitza únicament a través del bus DC, ja que tant el rectificador AFE com l'inversor disposen del seu propi sistema de control i són capaços d'autogestionar-se. La connexió amb el motor es fa a través de les bornes 24, 25 i 26, les quals representen les tres fases que formen el sistema trifàsic equilibrat (U, V, W), que alimenten el motor d'inducció.

El control de càrrega del condensador es fa tant per la part del rectificador AFE com per la part de l'inversor, ja que al treballar bidireccionalment, tant pot ser que l'energia provingui del rectificador com de l'inversor.

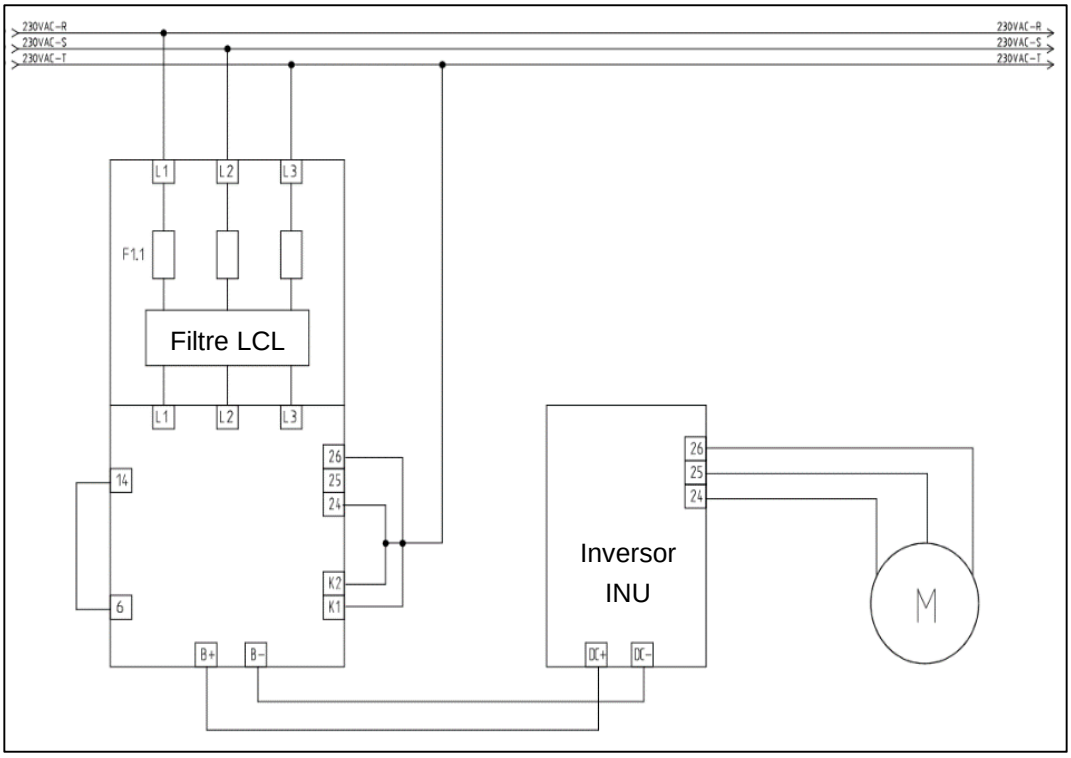


Figura 3.2: Esquema de muntatge i connexions de l'inversor amb el rectificador AFE i el motor.

En la figura 3.2. es mostra la connexió, on s'ha utilitzat la numeració especificada pel fabricant. Tot seguit s'explicarà la funció de cada punt de connexió, per al funcionament dels sistema AFE:

- **AFE L1, L2, L3:** Connexió a la font principal de tensió trifàsica de 230V.
- **AFE 24-NC, 25-C, 24-NO:** Sortida relé que controla el contactor principal K1 i el contactor del circuit de precàrrega K2.
- **AFE K1 i K2:** Alimentació del contactor principal (K1) i del contactor del circuit de precàrrega (K2).
- **AFE Sortida (6):** de 24Vdc de l'AFE, que serveix per controlar l'estat del contactor principal K1. Quan el contactor K1 es tanca, s'activa la sortida.
- **AFE Entrada digital (4):** serveix per monitoritzar l'estat del contactor principal K1 (Sortida relé RO2).
- **AFE B+ i B- :** Connexió bus de continua (sortida de potència).
- **INU B+ i B- :** Connexió del bus de continua (entrada de potència).
- **INU 24-U, 25-V, 26-W:** Sortida de tensió trifàsica 230V.

4. Equips i muntatge utilitzats en estudi experimental del rectificador AFE

En aquest capítol es presentaran els equips utilitzats per a l'estudi experimental del rectificador AFE. El tractament de les dades obtingudes experimentalment, per obtenir dades i gràfics útils per a l'avaluació dels resultats i finalment els resultats dels diferents assajos realitzats. Així mateix, es farà l'avaluació de les dades obtingudes i finalment es presentaran les conclusions obtingudes de l'estudi experimental.

4.1. Introducció als assajos

Els assajos realitzats en aquest projecte serviran per fer l'estudi experimental del funcionament del rectificador AFE, en diferents situacions de treball. Per assajar les diferents situacions de treball es farà el muntatge la Figura 4.1. El muntatge consisteix en un rectificador AFE connectat a la xarxa, que alimenta un motor a través del bus de continua a través d'un variador de freqüència.

Per a l'estudi experimental del rectificador AFE es mesuraran diferents paràmetres, que serviran per avaluar el funcionament del sistema davant les diferents hipòtesis de treball. A continuació es llisten els paràmetres que es mesuraran experimentalment en els assajos:

- Tensió de la font AC (xarxa), tensió en la càrrega (motor d'inducció) i tensió en el bus de continua.

- Corrent absorbida de la font AC (xarxa), corrent consumida per la càrrega (motor d'inducció).
- Velocitat de gir de l'eix del motor.
- Parell a l'eix del motor.

Els punts on s'han mesurat aquests paràmetres es poden veure en la Figura 4.2.

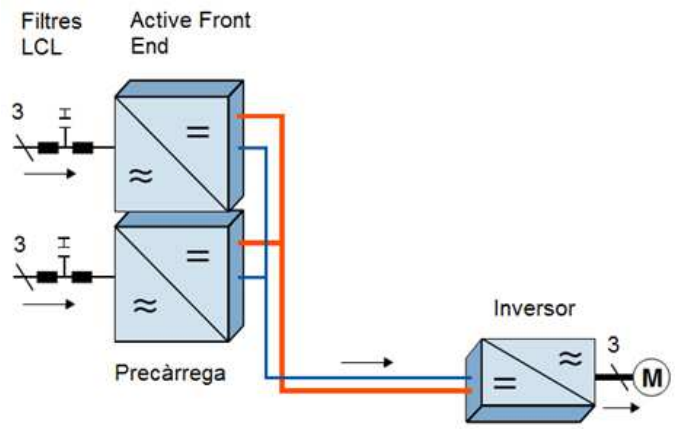


Figura 4.1: Muntatge experimental per assajar el rectificador AFE.

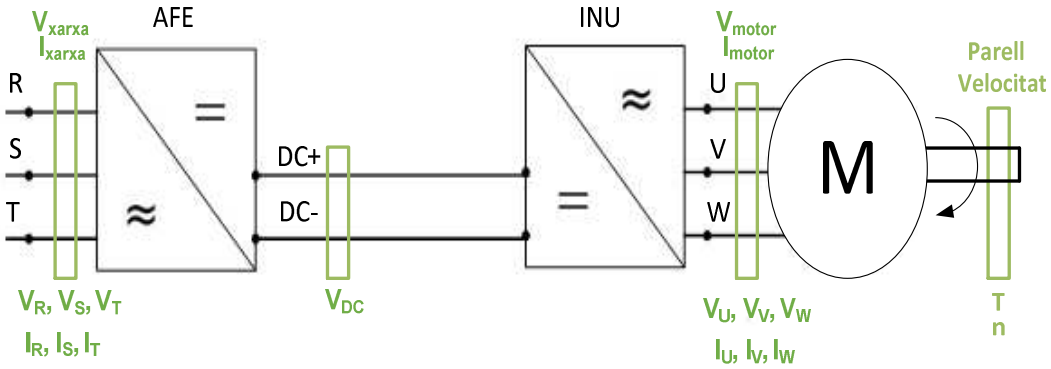


Figura 4.2: Paràmetres mesurats i punts de mesura.

A més de les dades mesurades experimentalment en el muntatge, també s'ha realitzat el càlcul de les potències instantànies. Aquestes serviran per avaluar la potència útil entregada útil, els consums de potència de la càrrega i la potència absorbida pel conjunt AFE + Inversor + Motor. Per altra banda, a partir d'aquestes potències es podrà determinar el mode de funcionament del rectificador i l'eficiència del sistema.

La captura de dades s'ha fet utilitzant un oscil•loscopi multicanal, per tal d'obtenir un conjunt de dades referenciades respecte un únic eix d'abscisses (eix temporal)

i obtenir un conjunt de mesures homogeni. Cada paràmetre mesurat genera un vector de dades amb 10010 valors per paràmetre. La longitud d'aquest vector correspon a un interval temporal de 0,5s. Això vol dir, que es captura una mesura cada 50µs i si es considera que la freqüència de la font AC és de 50Hz, el període és de 0,02s, i per tant s'obtenen 400 mesures per període. Aquesta densitat de captures per cicle permetrà obtenir una bona definició dels senyals ha estudiar i poder-les representar gràficament.

El tractament de les dades capturades i la representació gràfica s'ha fet utilitzat el software MATLAB. Per extreure cada paquet de dades s'ha creat una funció, la qual assigna cada vector de valors mesurats a una variable, que representa un dels paràmetres establerts. D'aquesta manera es podrà fer de forma simple el càlcul de potències i la representació gràfica de cada paràmetre.

La funció utilitzada pel tractament de les dades és la funció ASSAJOS_AFE (mostrada a l'ANNEX A). Aquesta funció assigna a cada variable els valors mesurats i calcula les potències instantànies. Després retorna 3 figures en les que s'hi representen tots els paràmetres mesurats i calculats.

En l'avaluació dels resultats també es calcularan els desfasaments entre tensions i corrents. Per fer-ho es prendran els temps de referència de cada fase i senyal, com poden ser els màxims o punt de tall de l'eix d'abscisses a partir de les gràfiques. La precisió temporal d'aquests punts serà de 0,001s, el que equival a una precisió sexagesimal de 18º.

Per determinar el desfasament temporal cal determinar aquests instants el més acuradament possible. Les dades mesurades consistiran en un conjunt de punts que segurament no representaran una senyal continua i homogènia, per això abans de determinar els punts característics s'ha fet una aproximació mitjançant sèries de Fourier. A continuació s'explicarà el procés que s'ha seguit per representar els resultats de tensió i corrent AC, de manera que s'aproximin a un senyal sinusoïdal.

Els senyals a tractar pel càlcul dels desfasament són la tensió i el corrent de la xarxa i el motor, ambdós de caràcter altern sinusoïdal. Les dades experimentals d'aquestes variables, però, especialment els senyals rectificats, estan formats per pulsos de forma quadrada. Això fa que determinar l'instant que representa el màxim o el punt de tall no sigui immediat. Per tant, l'aproximació d'aquests a un senyal periòdic sinusoïdal és imprescindible per aconseguir una bona precisió.

L'aproximació de les dades experimentals capturades s'ha fet utilitzant el software MATLAB, el qual proporciona eines específiques per a l'aproximació de dades.

En primer lloc es seleccionen les dades corresponents a l'interval ha estudiar. Així com el vector d'abscisses corresponent al tram d'estudi, per poder-ne fer l'aproximació respecte aquest eix.

Després s'inicia l'eina cftool, la qual permet realitzar diferents tipus d'aproximació de les dades. En aquest cas i tractant-se d'un senyal periòdic sinusoïdal s'ha utilitzat l'aproximació mitjançant sèries de Fourier. Així doncs, determinant els coeficients a de la següent equació, es poden aproximar les dades experimentals a un senyal sinusoïdal:

$$x(t) = a_0 + a_1 \cdot cos(2\omega_0 \cdot t + \theta_1) + a_2 \cdot cos(2\omega_0 \cdot t + \theta_2) + \ldots + a_N \cdot cos(N\omega_0 \cdot t + \theta_N)$$

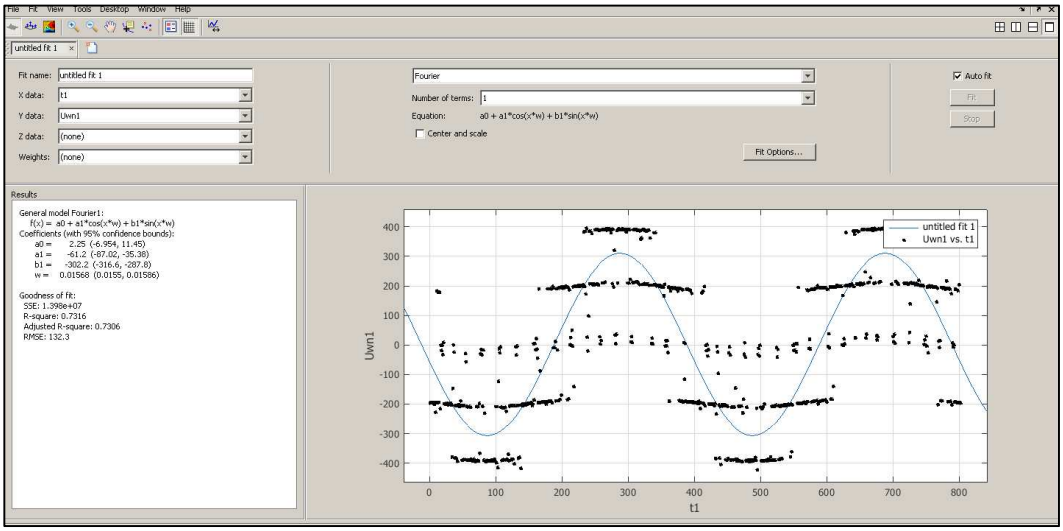


Figura 4.3: Eina de MATLAB cftool, mitjançant podem aproximar les dades experimentals

Per calcular els desfasaments entre els senyals de tensió i corrent al motor i a la xarxa, s'ha aproximat el conjunt de dades corresponents a les tensions i corrents de la xarxa i el motor, ja es pot procedir a la seva representació gràfica. Com es pot veure el la figura 9, els senyals ara representats presenten una forma sinusoïdal en la que es poden determinar de forma precisa els instants de pic o de tall de l'eix d'abscisses.

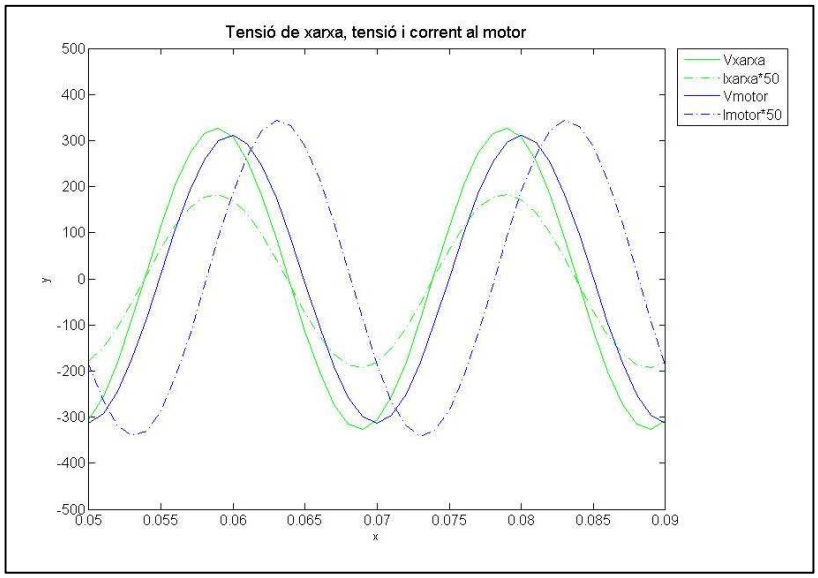


Figura 4.4: Representació gràfica dels senyals de tensió i corrent després d'haver-ne fet l'aproximació per sèries de Fourier.

Un cop es tinguin els punts característics, ja es pot calcular el desfasament temporal (t_d) entre els diferents senyals de tensió i corrent :

$$t_d = t_{màx\ tensió} - t_{màx\ corrent} \qquad \text{(Eq. 4.1)}$$

Un cop obtingut el desfasament temporal, ja es pot determinar el desfasament en graus sexagesimals, realitzant la conversió amb la següent formula:

$$t_d = t_{màx\ tensió} - t_{màx\ corrent} \qquad \text{(Eq. 4.1)}$$

Un cop es té el desfasament temporal, ja es pot convertir en un desfasament radial, utilitzant la següent formula:

$$\varphi = \frac{(t_d \cdot 360)}{T} \qquad \text{(Eq. 4.2)}$$

on t_d és el temps de desfasament entre dos senyals i T és el període d'aquests senyals. En aquest cas, com es treballa a la freqüència de la xarxa (50Hz), el període és de 0,02s.

4.2. Presentació dels equips escollits

L'objectiu d'aquest projecte és l'estudi de l'equip AFE funcionant en mode regeneratiu. Per tant, un dels punts importants, es la presencia física d'un equip amb el que es pugui treballar experimentalment i estudiar-ne el funcionament. A

continuació es descriuran les característiques rellevants d'aquests equips objecte d'estudi, l'AFE i l'INU. Ambdós equips són del fabricant VACON, ja que d'aquesta manera es podrà assegurar una millor compatibilitat a nivell de connexionat i funcionament entre equips.

Els elements principals utilitzats en els assajos experimentals d'aquest projecte són: una font de tensió AC, un rectificador (AFE), un inversor (INU), un motor d'inducció de gàbia i l'equip de mesura. En aquest apartat es presentaran el rectificador (AFE) i l'inversor (INU), ja que són els equips d'interès d'estudi del projecte.

4.2.1. Rectificador Active Front End (AFE)

El rectificador AFE utilitzat en l'estudi experimental d'aquest projecte ha estat el rectificador de la família NXA del fabricant VACON.

Les parts que constitueixen el rectificador Active Front End i les seves característiques, ja han esta descrites en el capítol 2. Així doncs, en aquest apartat només s'anomenaran els principals blocs que conformen el rectificador Active Front End (Figura 4.5) i la seva funció:

- **Font AC:** Aquesta és la font d'alimentació principal.
- **Interruptor principal:** Aquest és un interruptor trifàsic d'accionament manual per connectar l'equip a la font principal.
- **Fusibles AC i contactor principal:** Els fusibles AC protegeixen el rectificador AFE contra sobreintensitats. El contactor principal connecta el rectificador AFE a la font principal quan s'ha completat la precàrrega.
- **Circuit de precàrrega:** Circuit auxiliar, que treballa en paral·lel al rectificador AFE, i és l'encarregat d'establir les condicions inicials per l'activació del rectificador AFE.
- **Filtre LCL:** Atenua les irregularitats dels senyals d'entrada i sortida del rectificador.
- **Rectificador AC/DC:** Conjunt de transistors i sistema de control encarregats de fer la conversió AC/DC de forma activa.
- **Fusibles DC:** Protegeixen el bus DC contra sobreintensitats de forma passiva.
- **Bus DC:** Bus de corrent continua encarregat de la distribució de potència entre els equips.

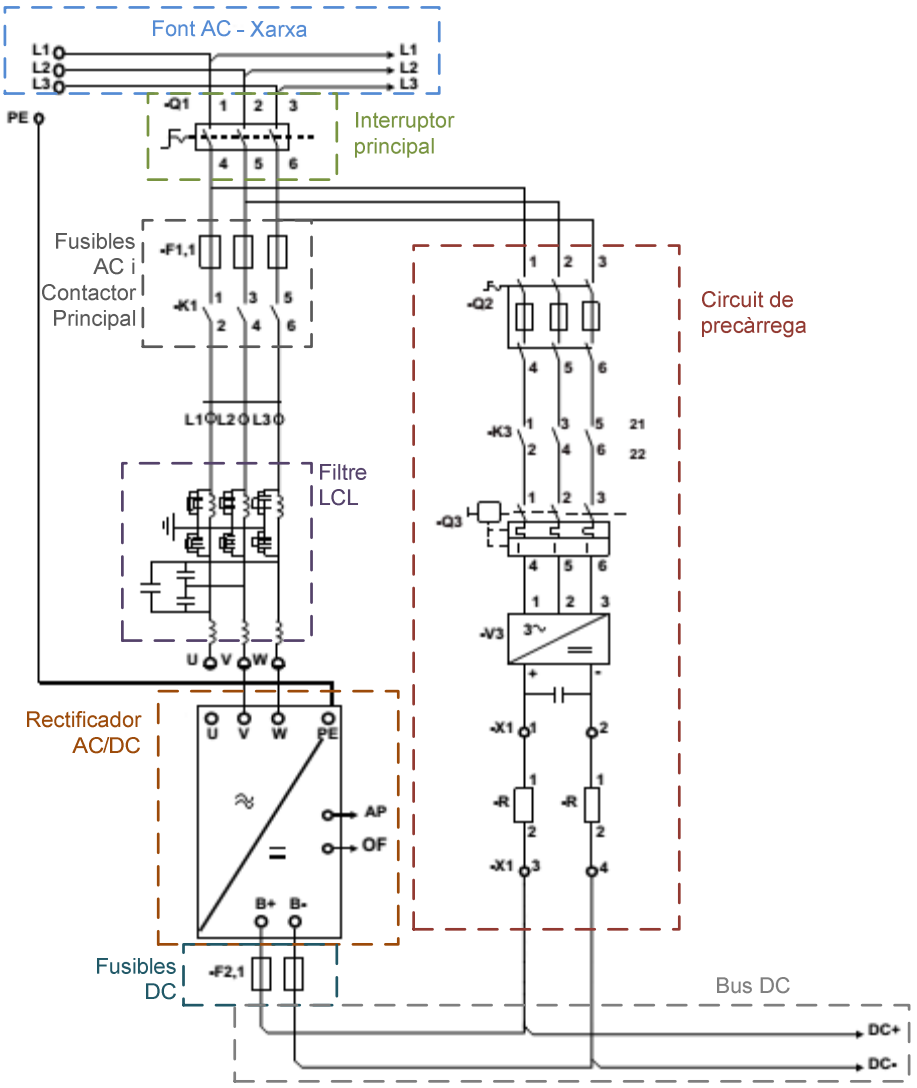


Figura 4.5: Blocs que conformen el rectificador AFE.

4.2.2. Unitat Inversora (INU)

La unitat inversora és un element gairebé imprescindible en l'alimentació d'equips mitjançant un AFE. Els aparells elèctrics, siguin o no industrials, es dissenyen per treballar a tensions normalitzades com és la de la xarxa elèctrica (230/400V). Així doncs, la utilització d'un bus de continua per alimentar aquests equips no és possible, ja que aquest no constitueix una font normalitzada. D'aquesta manera serà necessari la utilització d'un equip que pugui adequar la tensió del bus DC a les necessitats de l'equip a connectar.

En aquest projecte l'equip connectat al bus de continua és un motor de gàbia d'esquirol. Aquest motor treballa amb una tensió trifàsica alterna nominal de 230Δ /400 Y, per tant no és possible connectar-lo directament al bus DC. Per fer possible la connexió entre el motor i el rectificador AFE, serà necessari utilitzar un inversor,

el qual pugui transformar la tensió continua del bus DC a una tensió alterna trifàsica 230/400V. Així doncs, la utilització d'inversors és la manera més fàcil d'alimentar equips a través del bus de potència continua (Figura 4.6).

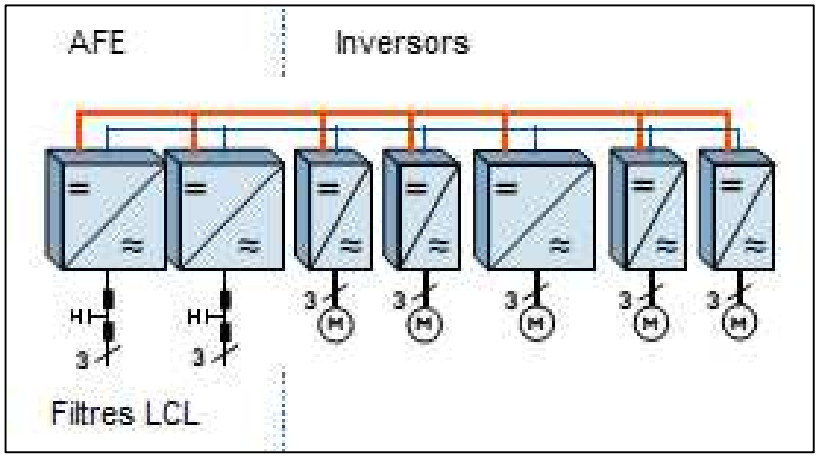


Figura 4.6: Muntatge general d'un rectificador Active Front End (AFE) alimentant un conjunt de motors AC, mitjançant Inversors (INU).

La unitat inversora escollida és un equip NXP del fabricant VACON. Aquest equip ha estat dissenyat per treballar conjuntament amb un rectificador AFE i per tant alimentat a través d'un bus DC. Aquest equips transformarà la tensió DC en una tensió trifàsica 230/400V, la qual és una tensió normalitzada amb la que es poden alimentar un ampli ventall d'aparells elèctrics.

Els inversors de la família NX de VACON estan fabricats complint amb la conformitat europea (CE). L'acreditació de la marca CE, permet assegurar el compliment de les directives LVD (Low Voltage Directive) i la EMC (Electro Magnetic Compatibility). Aquesta última, d'especial importància, ja que garanteix que l'equip no alterarà de forma perjudicial l'entorn en el que es connecti. A més, també garanteix que les alteracions externes no alteraran el correcte funcionament de l'inversor.

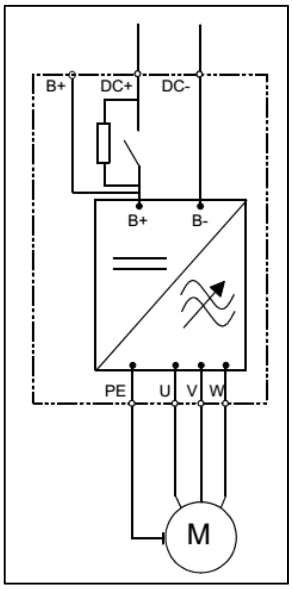


Figura 4.7: Esquema general de les connexions de l'inversor amb el bus DC i el motor.

L'inversor és un equip altament estès, en la conversió AC/DC com en la conversió DC/DC. Aquests equips estan formats per dues unitats principals (Figura 4.8), les quals són:

a) Unitat de potència: Aquesta unitat està formada per un rectificador de transistors (IGBT), per produir un voltatge trifàsic modulat (PWM). A més, igual que passa amb el rectificador AFE, per una posada en marxa segura i protegir els condensadors de pics de corrent, aquesta unitat també està proveïda d'un circuit de càrrega. Aquesta serà l'encarregada de proporcionar el nivell de tensió adequat a tots els elements, per poder arrencar l'equip de forma segura.

b) Unitat de control: El mòdul de control està basat en un microprocessador programat, que controla el motor basant-se en els valors obtinguts de les mesures, els paràmetres configurats, el control d'entrades i sortides i la pantalla de control.

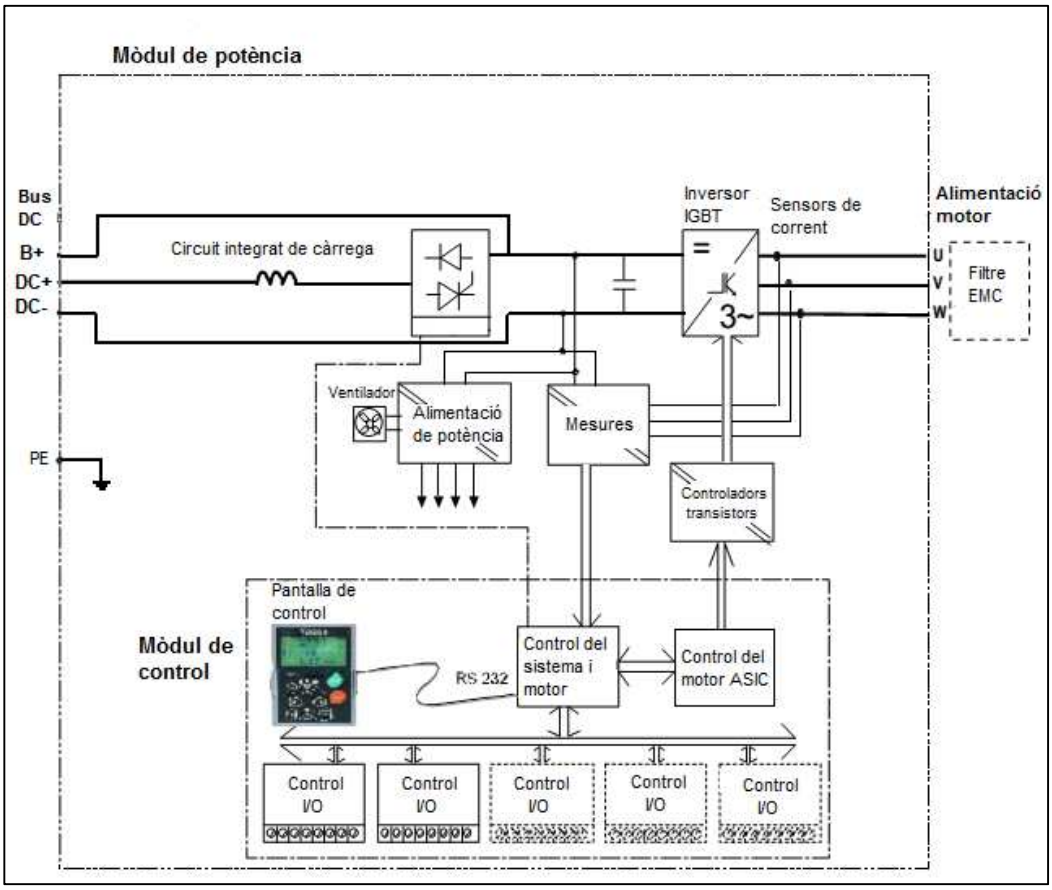


Figura 4.8: Esquema de la unitat inversora.

4.2.3. Motor asíncron de gàbia d'esquirol

El motor escollit per a la realització dels assajos és un motor asíncron de gàbia d'esquirol. El model escollit és de la sèrie M3AA112MB-4 (3GAA112312-ASE) del fabricant ABB (Figura 4.9).

Aquest motor ha estat fabricar utilitzant l'estàndard IEC 60034-1 establert per la Comissió Internacional Electrotècnica, que regula la fabricació de maquines elèctriques rotatives, i la IEC 60072, pel que fa ala part mecànica. A més, ha estat certificat amb la ISO 9001 (estàndard internacional de qualitat), amb la ISO 14000 (estàndard mediambiental) i certificat per totes les directives aplicables de la EU.

Figura 4.9: Motor ABB M3AA112MB-4 (3GAA112312-ASE) i la seva placa de característiques.

MOTOR ETSEIB					
3~Motor	(M3AA112MB-4)		CL.F	IP 55	
3GAA112312-AGE IM1001					
nº. 3GE10641002045					
V	Hz	r/min	kW	A	Cosφ
230 Δ	50	1445	4	15,2	0,75
400 Y	50	1445	4	8,8	0,75
415 Y	50	1450	4	8,0	0,71

Taula 4.1: Dades extretes de la placa de característiques del motor.

La configuració utilitzada en els assajos és la connexió estrella en la que alimentem els borns U, V, W a una tensió de fase de 400V o 415V. Els valors nominals en aquesta connexió són els marcats en la taula 4.1. També es pot veure en la taula com en funció de la tensió d'entrada 400/415V el motor canvia de velocitat i corrent absorbit així com de factor de potència.

Els motors inductius són els més usats per treballar conjuntament amb els anomenats variadors de freqüència. El treball conjunt d'aquests dos equips fa que se'n pugui treure el màxim rendiment, a més de permetre la recuperació d'energia, contribuint ala reducció d'emissions.

Algunes característiques destacables d'aquest motor són:

- Motor asíncron de 4 pols.
- Motor refrigerat per ventilació natural.
- Carcassa d'alumini.
- Tipus de muntatge: *foot-mounted*.

Coneixent el número de pols del motor (4 pols)i sabent la freqüència d'alimentació (f= 50Hz). Es pot calcular la velocitat de sincronisme del camp magnètic generat.

$$n_{sinc} = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 50}{4} = 1500\ rpm$$

A més , en la placa de característiques (Figura 4.1), es pot veure com les velocitats especificades són diferents a la velocitat de sincronisme. Això indica que existirà un lliscament que en el cas de lliscament màxim (400V) valdrà:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \cdot 100 = \frac{1500 - 1445}{1500} \cdot 100 = 3{,}7\%$$

En la següent taula 4.2 es poden observar les característiques de funcionament proporcionades pel fabricant.

P [kW]	n [rpm]	η (plena càrrega 100%)	η (3/4 càrrega 75%)	cosφ 100%	I_N[A]	$\frac{I_N}{I_S}$	T_N[Nm]	$\frac{T_S}{T_N}$	$\frac{T_{màx}}{T_N}$
400V 50Hz					**disseny CENELEC***				
4	1450	87,4	87,6	0,77	8,6	7,5	26,4	3,7	4,0

n [rpm]	η (plena càrrega 100%)	cosφ 100%	I_N[A]	n [rpm]	η (plena càrrega 100%)	cosφ 100%	I_N[A]	Moment d'inèrcia J[kgm^2]	Pes[kg]	Pressió sonora L_p [dB]
380V 50Hz				**415V 50Hz**				**disseny CENELEC**		
1445	87,3	0,81	8,6	1455	87,5	0,73	8,8	0,0126	34	64

Taula 4.2: Dades tècniques extretes del catàleg del fabricant ABB.

* CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization

5. Estudi experimental del rectificador AFE davant un sot de tensió

En aquest capítol s'ha estudiat el rectificador AFE alimentant un motor d'inducció de gàbia d'esquirol, treballant com a variador de freqüència. Tot i que el mode de funcionament utilitzat en aquests assajos és el que podria realitzar qualsevol altre rectificador. En els experiments presentats en aquest apartat s'estudia el seu comportament davant d'un sot de tensió. Així doncs en els següents resultats es podrà veure la reacció del rectificador AFE a un sot de tensió mentre treballa com a variador de freqüència.

5.1. Introducció

Els assajos presentats en aquest apartat no són únicament un anàlisi de rectificador AFE treballant coma rectificador, si no que també volen estudiar la reacció del rectificador davant alteracions en la font principal. Els resultats que es presenten a continuació són els paràmetres mesurats quan es produeix un sot de tensió a la banda AC.

Els resultats aquí mostrats serviran per avaluar la capacitat de resposta del rectificador AFE, davant distorsions externes. A més, com també s'han pres mesures al motor, es podrà veure l'afectació d'aquestes afectacions sobre la càrrega.

5.2. Sots de tensió

Un sot de tensió consisteix, segons la norma CEI61000, en un descens brusc de la tensió en un punt de la xarxa elèctrica, seguit d'un restabliment de la tensió, després d'un curt període de temps de fins a algunes cicles de durada.

A més la normativa europea UNE-EN50160 aporta com a valors indicatius, que els sots de tensió tenen una durada de menys d'un segon i que la tensió rarament cau per sota del 40% del seu valor nominal.

Els sots de tensió es caracteritzen per la seva profunditat i la seva duració. L'origen d'aquest defecte és ocasionat habitualment per les següents causes:

- Curtcircuits o faltes: aquestes es produeixen en la xarxa de transport d'alta tensió o en la xarxa de distribució de mitja tensió, o inclús, en la pròpia instal·lació de mitja tensió dels usuaris.
- Operacions en les xarxes d'alta i mitja tensió o fins i tot en les instal·lacions de baixa tensió del propi usuari com la connexió de grans carreges o de grans transformadors de potència.
- Accidents naturals: caigudes de llamps, contacte amb branques o arbres caiguts.
- Maniobres en la línia de transport o distribució.

5.2.1. Caracterització dels sots de tensió

La caracterització dels sots de tensió es fa a partir de la profunditat i de la duració. La profunditat consisteix en el valor mínim que assoleix la tensió i la duració, en el temps d'aquesta caiguda de tensió.

La caracterització d'una línia monofàsica és trivial, ja que només cal mesurar el valor mínim i el temps de duració, però en línies trifàsiques no és tan fàcil. En línies trifàsiques la tensió està formada per tres fases, que treballen de forma conjunta, Això, fa que qualsevol variació en una de les fases suposi un problema en el funcionament de la línia Per tant, cal establir un mètode de classificació que permeti determinar l'estat de cada fase i el problema ocasionat.

Un dels mètodes més utilitzats per a la classificació dels sots trifàsics és el representat en la figura 5.1. En aquest mètode classifica els sots segons amplitud i l'angle de cada fase.

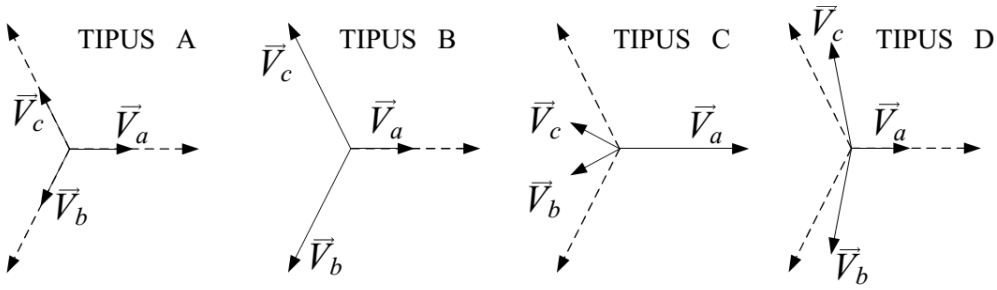


Figura 5.1: Representació fasorial de quatre tipus de sots de tensió.

Els sots tipus A i B són sots trifàsics i monofàsics, que no s'estudiaran en aquest projecte. El tipus de sot que s'utilitzarà per fer l'estudi del rectificador AFE és del tipus C. Aquest és un tipus de sot bifàsic en el que es modifica l'amplitud i l'angle.

5.2.2. Efectes dels sots de tensió

Els efectes dels sots de tensió varien en funció del tipus d'instal·lació i funció que aquesta desenvolupa. En instal·lacions industrials es poden donar diferents situacions, ja que mentre que un sot de curta durada té una afectació poc significativa en un motor de grans dimensions, pot ser un problema en els variadors de freqüència que controlen els motors o en altres instal·lacions com PLCs o pantalles de control. Per tant, és important poder minimitzar l'efecte directe d'aquests sobre els equips connectats a la xarxa.

Com ja s'ha vist en capítols anteriors el rectificador AFE fa d'enllaç entre la font principal i els equips connectats a aquesta. A més, també s'ha explicat la capacitat de controlar activament la rectificació i equilibrat dels senyals. Així doncs, el rectificador AFE permet absorbir de forma quasi immediata l'efecte d'un sot, per seguir subministrant energia als equips connectats al bus DC, sense que aquests notin el defecte.

5.3. Resultats dels assajos davant un sot de tensió

En aquest apartat es presentaran els resultats dels assajos del rectificador AFE davant d'un sot de tensió. Per poder analitzar el funcionament del rectificador AFE alimentat amb una font AC desequilibrada, s'han fet dos assajos en el que la font principal AC pateix un sot de tensió bifàsic.

Els resultats experimentals presentats s'han fet utilitzant el mateix muntatge, però utilitzant sots de diferent duració i diferents intervals d'anàlisi. En els dos assajos s'utilitza el motor treballant amb càrrega i amb un mateix parell desenvolupat en

l'eix del motor. D'aquesta manera es podran comparar els resultats i extreure'n les conclusions pertinents.

5.3.1. Resultats de l'Assaig 1: rectificador AFE davant un sot de 0,1s

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts en sotmetre el rectificador AFE a un sot de tensió. Per poder observar-ne la rectificació activa, s'ha fet l'assaig amb el rectificador alimentant el motor anteriorment descrit anteriorment (apartat 4.2.3), treballant amb càrrega. En aquestes condicions s'han realitzat dos assajos en els que s'ha capturat les dades en el tram que es produeix el sot. En els assajos 1.1 i 1.2 es presenten els resultats obtinguts i el detall de dos intervals amb una duració de 0,04s. En un interval treballa consumint potència de la font AC trifàsica equilibrada i en l'altre treballa es mostren els resultats durant el sot de tensió.

En els resultats presentats en la Figura 5.2 es mostren les dades experimentals capturades. En aquest interval es pot observar un sot de tensió en la font principal (Xarxa) d'una durada de 0,01s. A partir d'aquest instant es pot observar la resposta dels diferents senyals. A continuació es llisten algunes de les respostes que es poden observar directament en els resultats representats en la figura 5.2:

- En l'instant 0,17s s'inicia un sot bifàsic i aquest té una durada de 0,1s.
- Durant el sot el corrent de la font principal augmenta. Un cop finalitzat el corrent no s'estabilitza de forma immediata, però no apareixen pics.
- S'observen deformacions del senyals de corrent de la font AC i això també provoca desfasaments entre la tensió i el corrent.
- La tensió en el motor no pateix canvis apreciables a simple vista.
- Augmenta de forma notable el corrent d'una de les fases del motor.
- La tensió del bus DC oscil·la durant el sot.
- Igual que en el bus de contínua el parell i les potències oscil·len al llarg del sot de tensió.

En aquest apartat es presenten les dades capturades de l'Assaig 1. Aquestes dades tenen una duració de 0,5 en els que es poden distingir diferents estats de funcionament. Per fer l'anàlisi de dades se n'estudiaran dos intervals de 0,02s (2 cicles), que representin els diferents estats de treball. D'aquesta manera es podran

analitzar amb més detall el comportament dels diferents senyals capturats. Els intervals escollits en l'Assaig 1 són l'interval 0,05-0,09s i el 0,20-0,24s.

A més, dels resultats de la figura 5.3 i 5.4 també es presenta l'aproximació per Fourier d'una de les fases dels senyals de tensió i corrent de la xarxa i el motor. Aquesta aproximació serà imprescindible per obtenir un senyal sinusoïdal continu i uniforme que permeti el càlcul dels desfasaments entre senyals.

En les figures 5.3 i 5.4 s'hi representen gràficament les aproximacions dels senyals de tensió i corrent dels dos intervals estudiats en les que ja es poden veure algunes particularitats:

- En la figura 5.4 els senyals de corrent tenen una major amplitud que els de la figura 5.3.
- Els senyals de tensió de la figura 5.4 són lleugerament superiors als de la figura 5.2.
- En els sot de tensió (figura 5.4), apareix un desfasament entre els senyals de la xarxa.

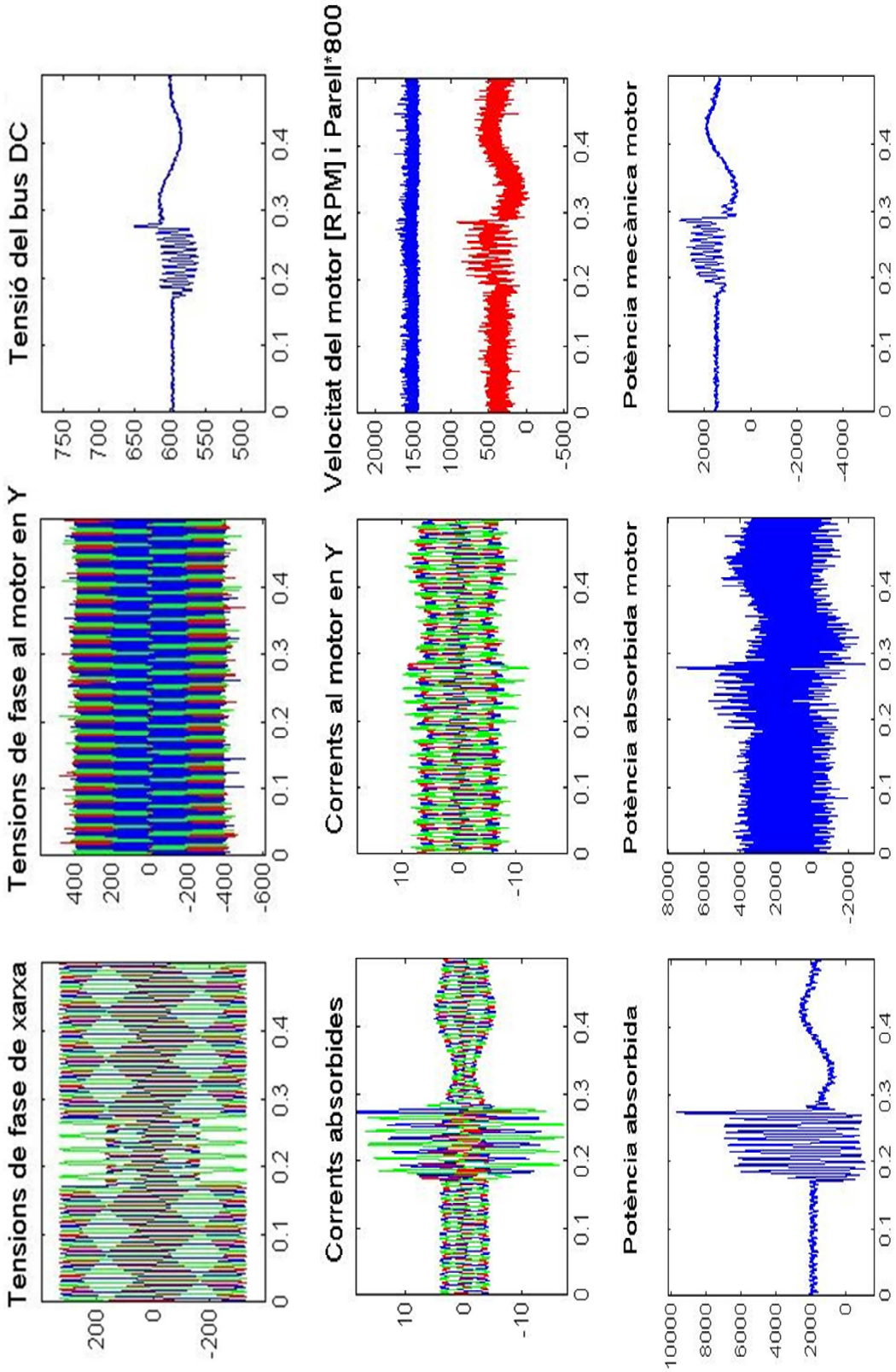


Figura 5.2: Captura de tensions, corrents, velocitat, parell i potències durant un interval de 0,5s, el qual compren un sot de 0,1s (Assaig 1).

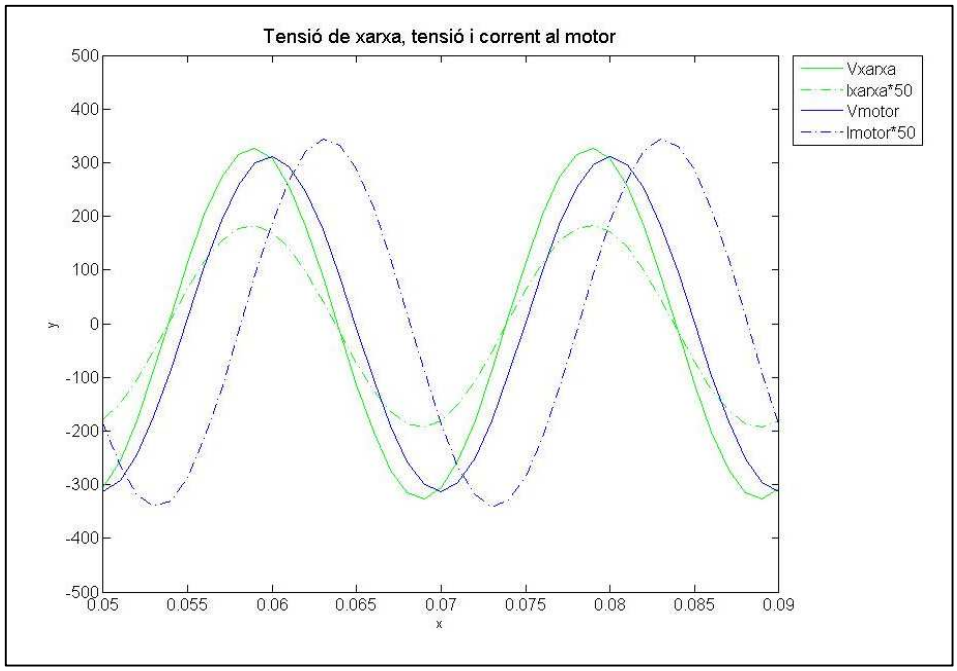


Figura 5.3: Tensions i corrents de la font principal i a la càrrega d'una única fase, en l'interval 0,05-0,09.

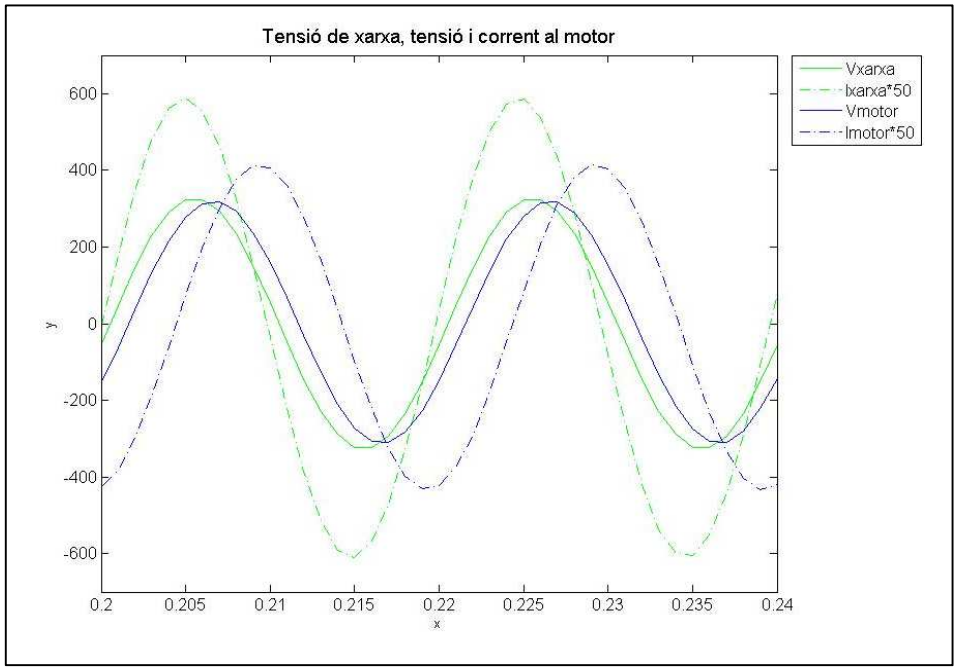


Figura 5.4: Tensions i corrents de la font principal i a la càrrega d'una única fase, en l'interval 0,2-0,24.

5.3.2. Resultats de l'Assaig 2: rectificador AFE davant un sot de 0,2s

Aquest assaig s'ha realitzat en les mateixes condicions que l'Assaig 2, per tal de poder comparar els resultats obtinguts i avaluar el funcionament del rectificador AFE davant un sot de tensió. El sot produit és del mateix tipus que el sot de l'Assaig 1, un sot bifàsic, però amb 1ua duració de 0,2s. D'aquesta manera es podran comparar la reacció de l'AFE en l'inici i final del sot i a més, es podrà veure si el comporatament d'un en un sot de major duració es produeix algun canvi en el funcionament.
A continuació es mostra el gràfic 5.5 en que es presenten les dades capturades de l'Assaig 2. En els resultats de la figura 5.5, ja es poden observar algunes característiques destacables dels senyals obtinguts:

- El corrent de la font AC, igual que en l'assaig anterior, presente variacions d'amplitud i deformacions.
- La tensió del motor es manté constant, tot i que apareixen alguns pics en el corrent, yal com passava en l'assaig anterior.
- També apareix una oscil·lació en el bus DC i les potències absorbida, consumida i mecànica. A més, però apareix una lleu oscil·lació durant el sot, que en l'assaig anterior s'accentuava en major grau quan ja havia finalitzat el sot.

A continuació, es presenten les aproximacions per Fourier d'una de les fases dels senyals tensió i corrent de la xarxa i del motor. Igual que en l'Assaig 1 aquestes aproximacions s'han fet en els intervals que representen diferents estats de treball, és a dir, quan treballa alimentat per una font trifàsica equilibrada i durant el sot de tensió. Els intervals escollits en l'Assaig 2 són el 0,10-0,14s i el 0,30-0,34s, en les figures 5.6 i 5.7 es poden veure les aproximacions respectives als intervals anteriors.

En aquestes figures es poden veure també algunes característiques significatives, que diferencien els dos intervals:

- L'augment de l'amplitud dels senyals de corrent durant el sot (figura 5.7) és molt semblant a la de l'Assaig 1.
- Els desfasaments entre els senyals de la xarxa en l'interval 0,30-0,34 és gairebé nul i per tant el cos(φ) serà pròxim a 1.
- A diferencia de l'assaig 1, els senyals de tensió de xarxa i del motor van gairebé en fase.

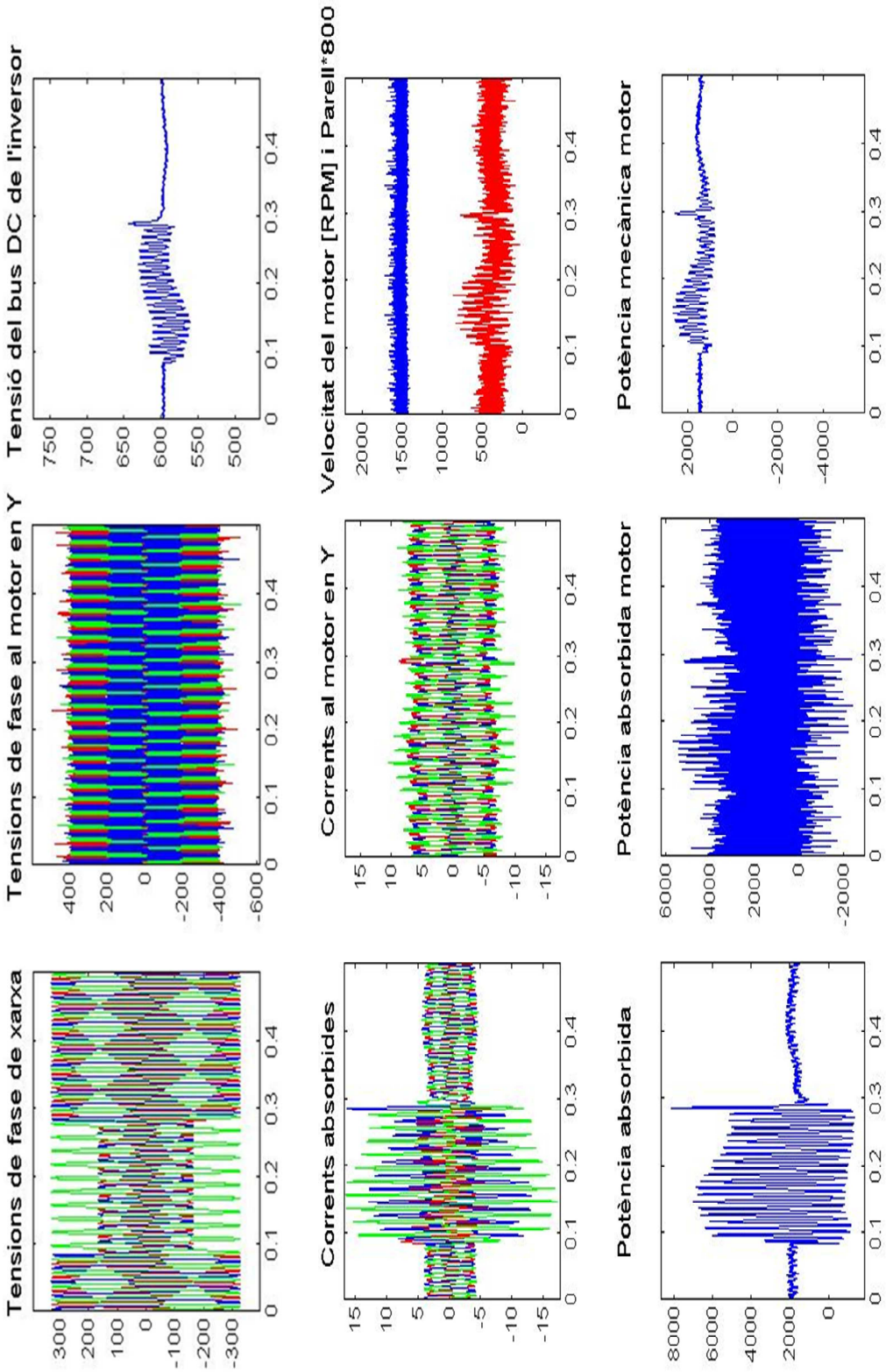


Figura 5.5: Captura de tensions, corrents, velocitat, parell i potències durant un interval de 0,5s, el qual compren un sot de 0,2s (Assaig 2).

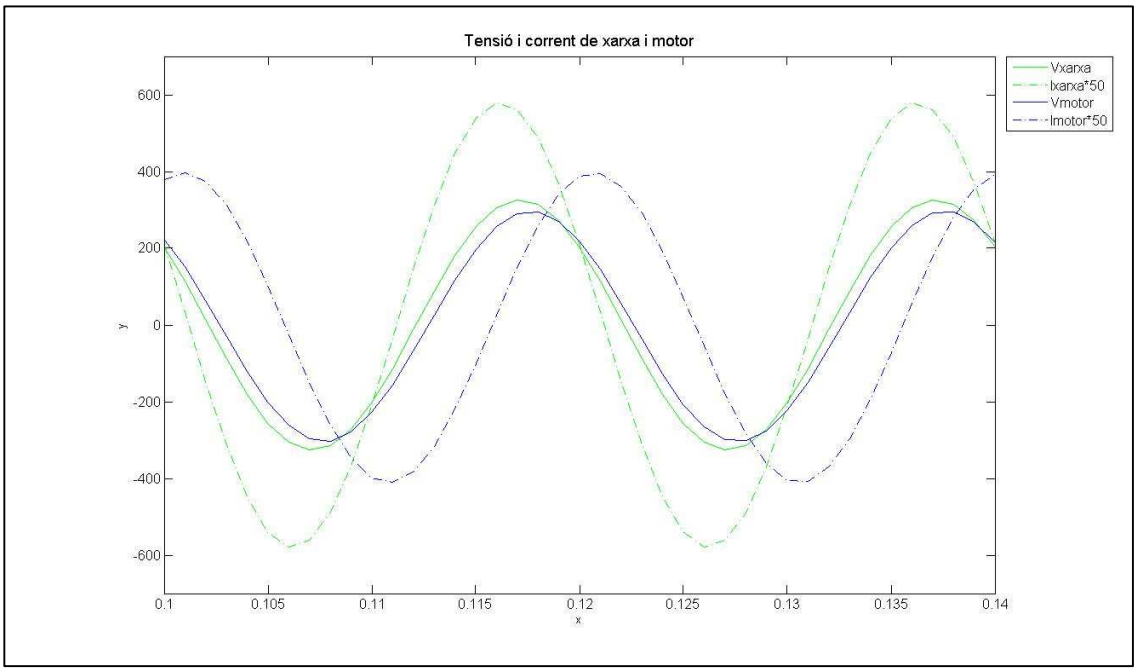


Figura 5.6: Tensions i corrents de la font principal i a la càrrega d'una única fase, en l'interval 0,10-0,14.

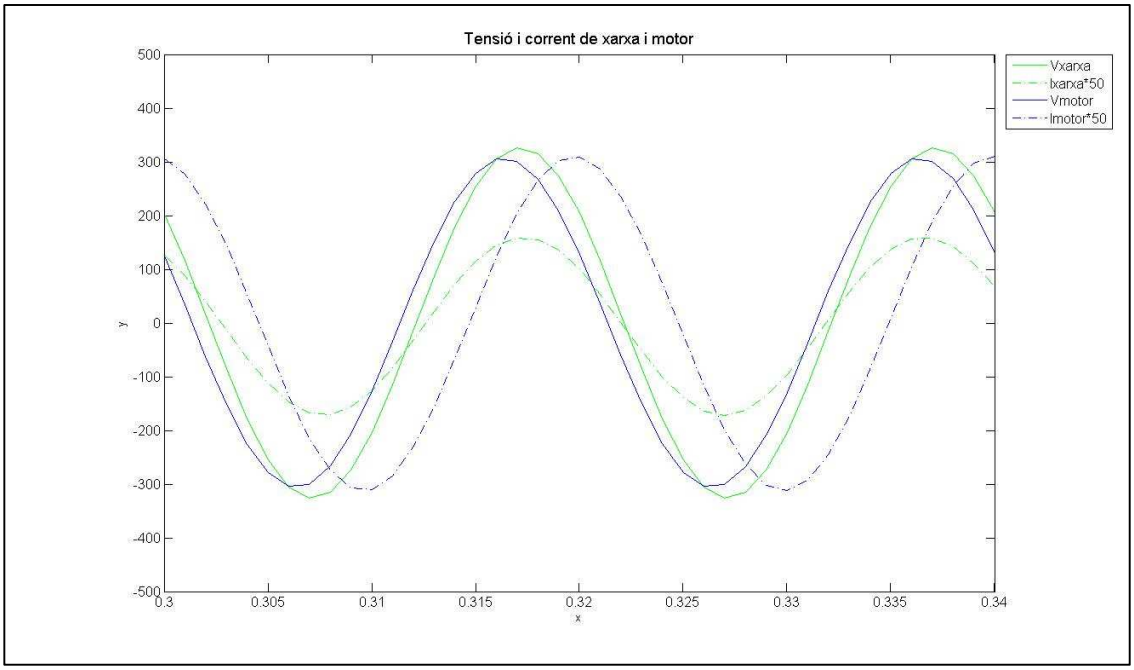


Figura5.7: Tensions i corrents de la font principal i a la càrrega d'una única fase, en l'interval 0,30-0,34.

5.4. Anàlisi dels resultats de rectificador AFE davant un sot de tensió

Per fer l'anàlisi dels resultats s'escolliran dos intervals de cada assaig. Aquests intervals tindran una duració de dos cicles, és a dir 0,04s. A més, cada un d'aquests intervals serà representatiu dels senyals a estudiar en un estat de funcionament. En els assajos 1 i 2 els intervals a analitzar, de forma individual i comparativament entre ells, són els del rectificador AFE alimentat amb una font trifàsica 230/400V equilibrada i l'interval en que es produeix el sot de tensió.

Abans de començar a l'anàlisi es definiran els intervals d'estudi de cada un dels assajos i la nomenclatura utilitzada. Per anomenar els intervals que representen els intervals en que el rectificador AFE està alimentat amb una font trifàsica equilibrada s'utilitzarà el subíndex "*e*". A més, en el subíndex i apareixerà el numero d'assaig al que fa referència. El subíndex utilitzat per l'interval representatiu del rectificador AFE treballant davant d'un sot de tensió serà "*s*", a més del número d'assaig al que correspon.

En la taula 5.1 es mostren els intervals temporals que s'analitzaran dels assajos 1 i 2. A més, també es mostra la nomenclatura que s'utilitzarà per fer-hi referència de forma abreujada.

Assaig	Interval [s]	Nomenclatura
1	0,05 – 0,09	I_{e1}
	0,20 – 0,24	I_{s1}
2	0,30 – 0,34	I_{s2}
	0,10 – 0,14	I_{e2}

Taula 5.1: Nomenclatura per la definició dels intervals dels assajos 1 i 2.

Per desenvolupar l'anàlisi d'una forma coherent s'ha cregut convenient començar per l'estudi dels senyals tensió i corrent que alimenten el rectificador AFE, el motor i el bus DC. A continuació s'analitzaran els desfasaments entre els senyals de tensió i corrent i es calcularan els respectius factors de potència. Tot seguit es comprovaran els senyals de velocitat i parell, per comprovar que el motor gira a la velocitat síncrona i el comportament del parell generat a l'eix motor. Un cop analitzats els senyals de tensió, corrent, els desfasaments entre aquests i es conegui el règim de funcionament del motor, es farà l'avaluació de les potències instantànies. Els senyals representats seran analítics, ja que s'hauran calculat a partir de les tensions i corrents instantànies, anteriorment analitzades. Finalment es calcularan els rendiments a partir de les potències instantànies calculades.

5.4.1. Anàlisi dels senyals de tensió

Els senyals de tensió estudiats són els de les tensions de la xarxa o tensions que alimenten el rectificador AFE (Figura 5.8), els senyals de tensió que alimenten el motor (Figura 5.9) i els senyals de tensió en el bus DC (Figura 5.10).

La tensió d'alimentació del rectificador AFE en els intervals I_e és una tensió trifàsica equilibrada de 230/400V. En produir-se els sots, la tensió de dues fases es redueix un 50%.

El sot mesurat queda dins dels paràmetres de la norma UNE-EN50160, en la que s'estableix que el 80% dels sots de la xarxa elèctrica no són inferiors al 40%de la tensió nominal de la línia.

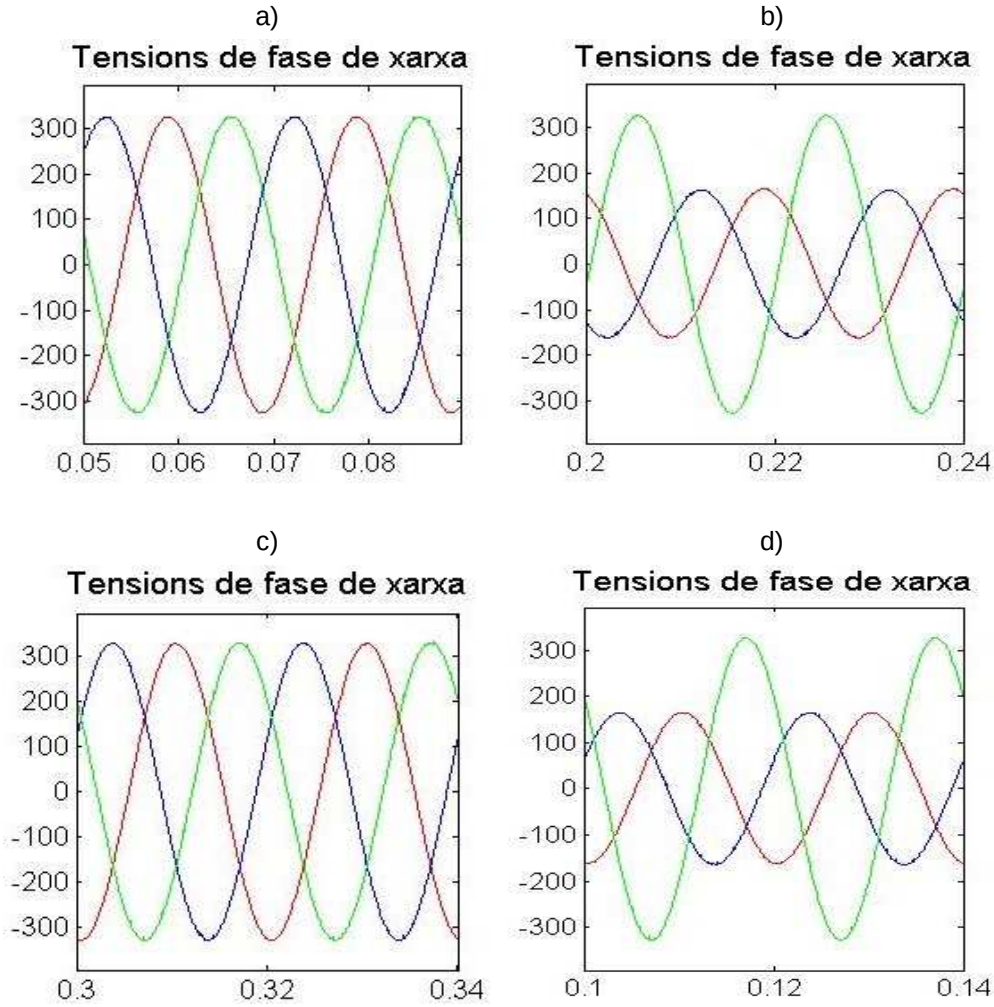


Figura 5.8: Senyals de tensió de xarxa dels assajos 1 i 2, en els intervals: a) I_{e1}, b) I_{s1}, c) I_{e2} i d) I_{s2}.

La tensió en el motor cal analitzar-la com un senyal PWM, ja que com es veu en la Figura 5.9, no és un senyal sinusoïdal com els corrents del motor (Figura 5.8). Els senyals creat mitjançant pulsos de tensió per tal d'aconseguir un senyal periòdic de valor eficaç 400V. Com es comprova en les representacions gràfiques d'aquests senyals s'aconsegueix un senyal continu molt pròxim als 400V.

En els senyals dels intervals I_e es pot veure com la tensió és més constant que en els intervals I_s. En els intervals I_{s1} i I_{s2} es pot veure com els valors de cresta tenen una variabilitat major. També caldrà veure com afecte aquesta ondulació al parell i potències generades. A més, d'una major oscil·lació en els intervals I_s, també es pot veure com els senyals de tensió generats no són tan uniformes con el l'interval I_e, ja que s'hi podem observar alguns buits.

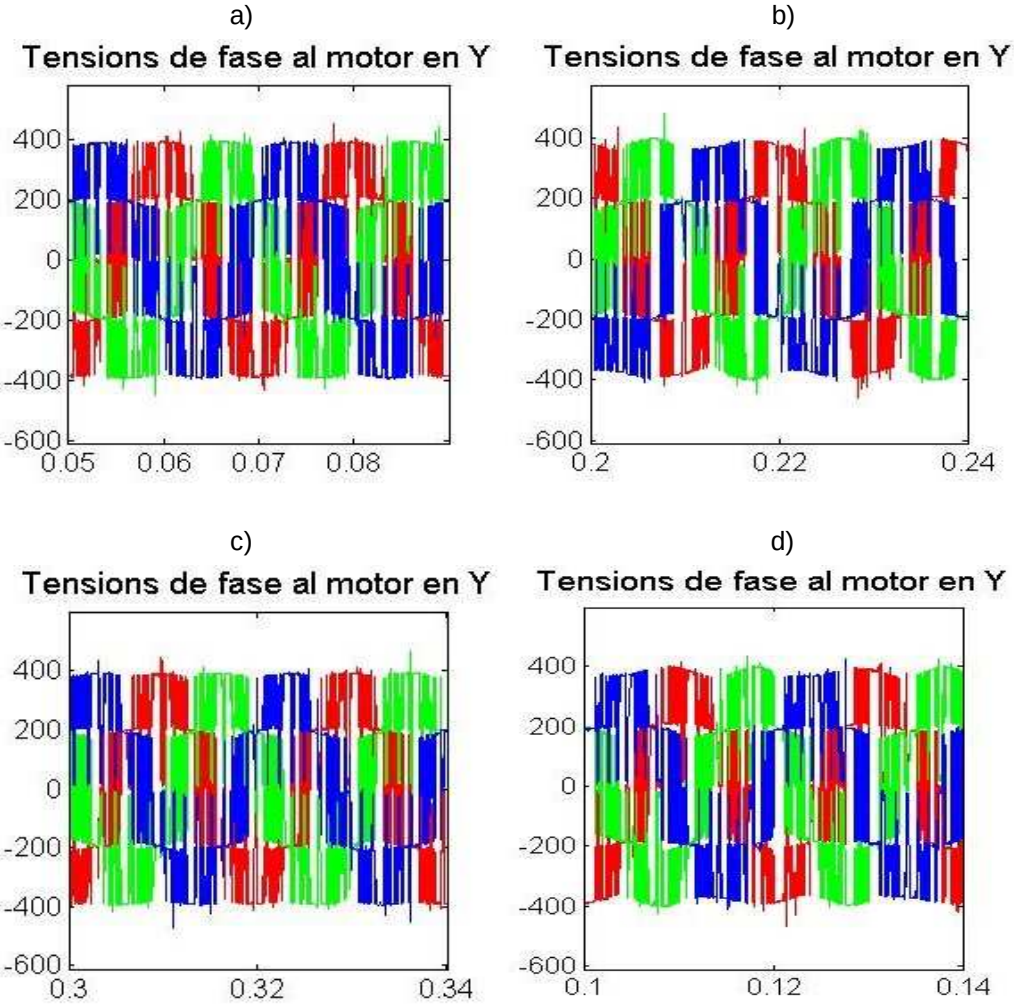


Figura 5.9: Senyals de tensió d'alimentació del motor dels assajos 1 i 2, en els intervals: a) I_{e1}, b) I_{s1}, c) I_{e2} i d) I_{s2}.

La tensió del bus de continua es manté, gràcies al control actiu, entre els 590 i els 400V en els quatre intervals analitzats. Així doncs, es pot considerar que el rectificador manté aquesta tensió prou propera a la tensió marcada pel fabricant (598V).

Tot i que la tensió mitja en el bus DC és la correcta, es pot veure que aquesta no és indiferent al sot de tensió, ja que en els intervals I_s apareix una ondulació. Aquesta ondulació genera una variació de la tensió d'aproximadament 25V, respecte el valor mig. Així doncs, caldrà analitzar com afecta aquesta variació en la tensió del bus DC als senyals d'alimentació del motor i a la potència entregada a la sortida del motor.

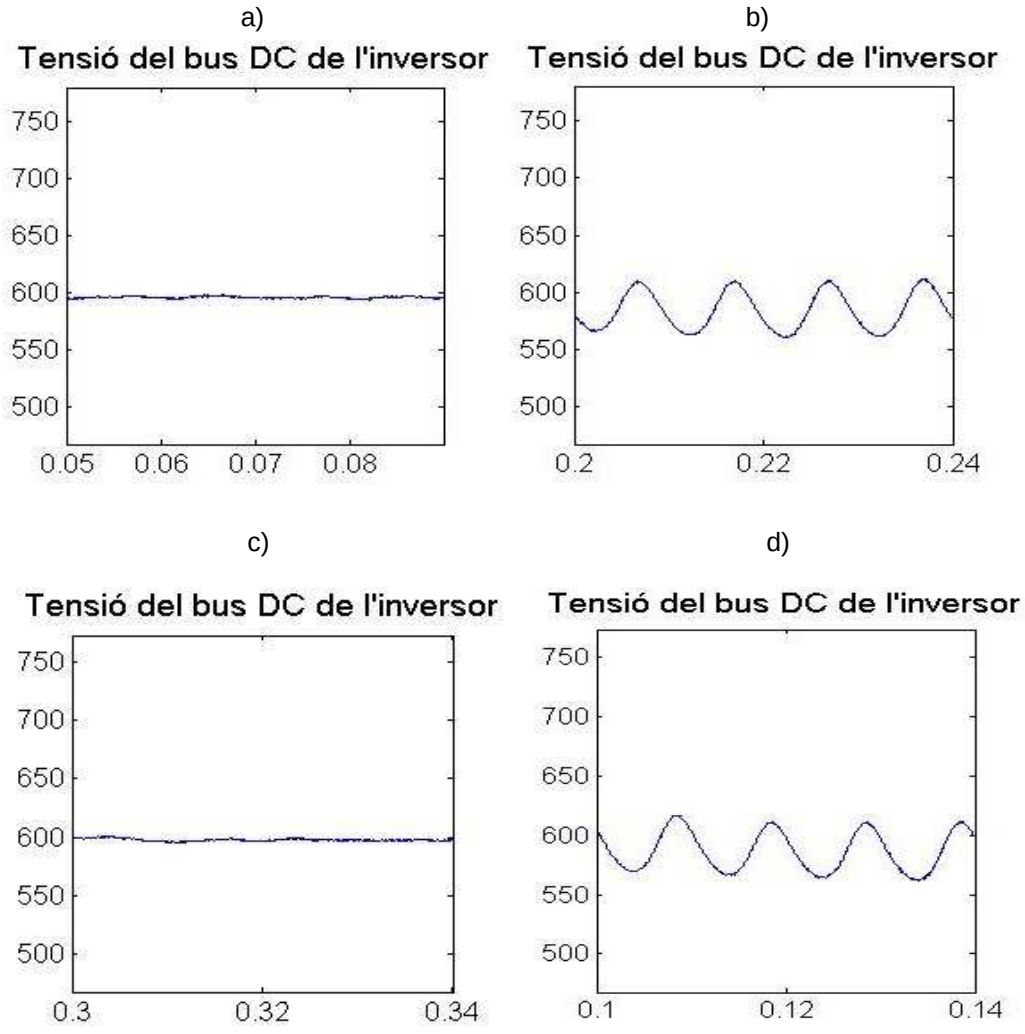


Figura 5.10: Senyals de tensió en el bus DC dels assajos 1 i 2, en els intervals: I_{e1}, b) I_{s1}, c) I_{e2} i d) I_{s2}.

5.4.2. Anàlisi dels senyals de corrent

Els corrents són els senyals que més varien, ja que aquest ha de compensar les variacions de la tensió, per poder mantenir el nivell de potència consumida. El valor de corrent en la font principal és d'aproximadament 2,6 A en I_{e1} i en I_{e2}, essent en ambdós casos un valor bastant estable. En canvi en els intervals I_{s1} i $I_{s1.2}$, els valors dels corrents de la font trifàsica es deformen i augmenten de forma desigual.

Tot i això, en els interval Is analitzats (figura 5.11), el senyal que augmenta més és la de la única fase que es manté a 230V. Els increments màxims de corrent dels intervals I_s respecte als dels intervals I_e són de 409% en I_{s1} i de 432% en I_{s2}. Els increments en l'amplitud de les altres fases és menor, per tant no haurien de ser un problema.

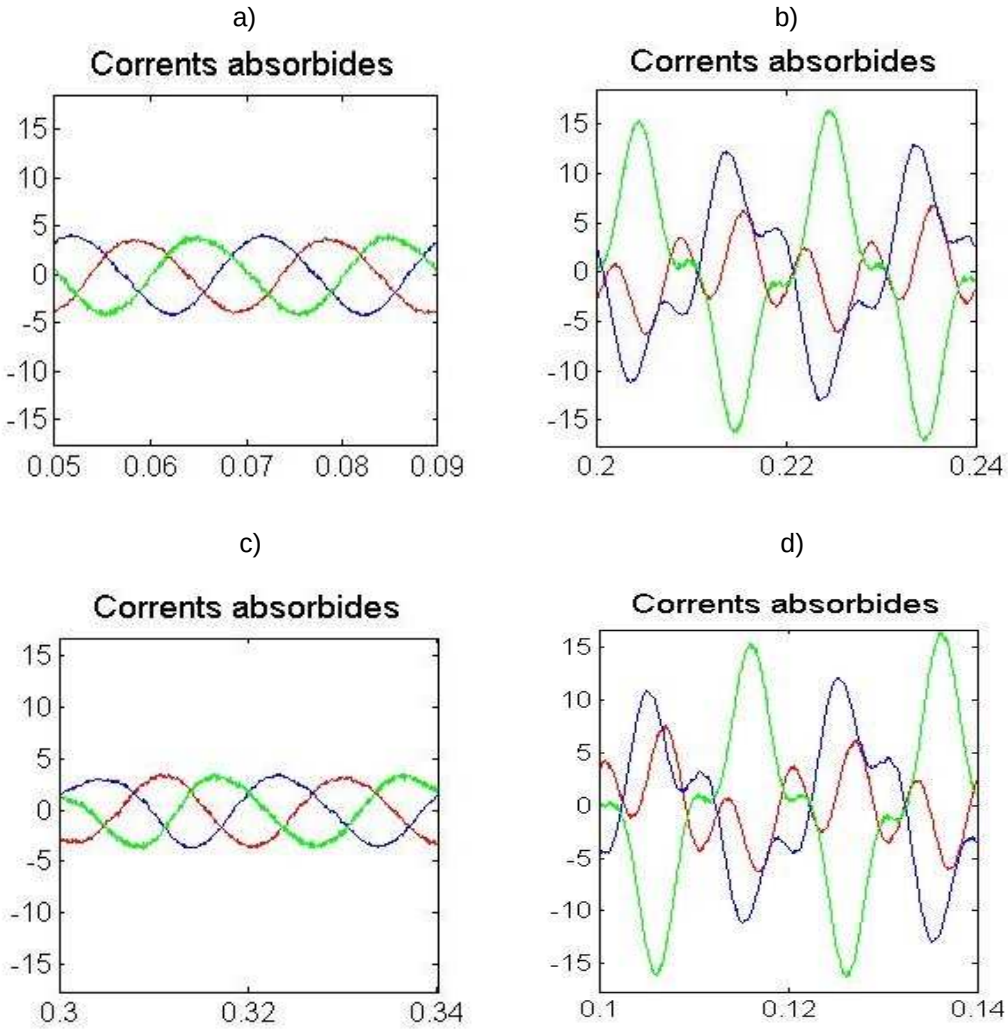


Figura 5.11: Senyals de corrent de la xarxa dels assajos 1 i 2, en els intervals: a) I_{e1}, b) I_{s1}, c) I_{e2} i d) I_{s2}.

Si s'analitzen els corrents d'alimentació del motor, tot i que també augmenten, aquests creixements entre els intervals I_e i I_s són menors, essent del 122% en I_{s1} i de 145% en $I_{s1.2}$ respecte els corrents dels intervals I_e. Tot i que els creixements percentuals dels corrents entre els intervals I_e i I_s dels assajos 1 i 2 són diferents, la reducció del corrent en el motor respecte al de la xarxa és d'aproximadament el 70% en els dos casos. Així doncs, es pot dir que el conjunt funciona de la mateixa manera en els dos intervals.

Per altra banda, aquesta reducció és una important mesura de seguretat per evitar danys permanents en els components del motor. A més, les deformacions que apareixien en els senyals de corrent de la xarxa també apareixen però de forma lleu i molt atenuades, igual que passa amb les variacions de les amplituds.

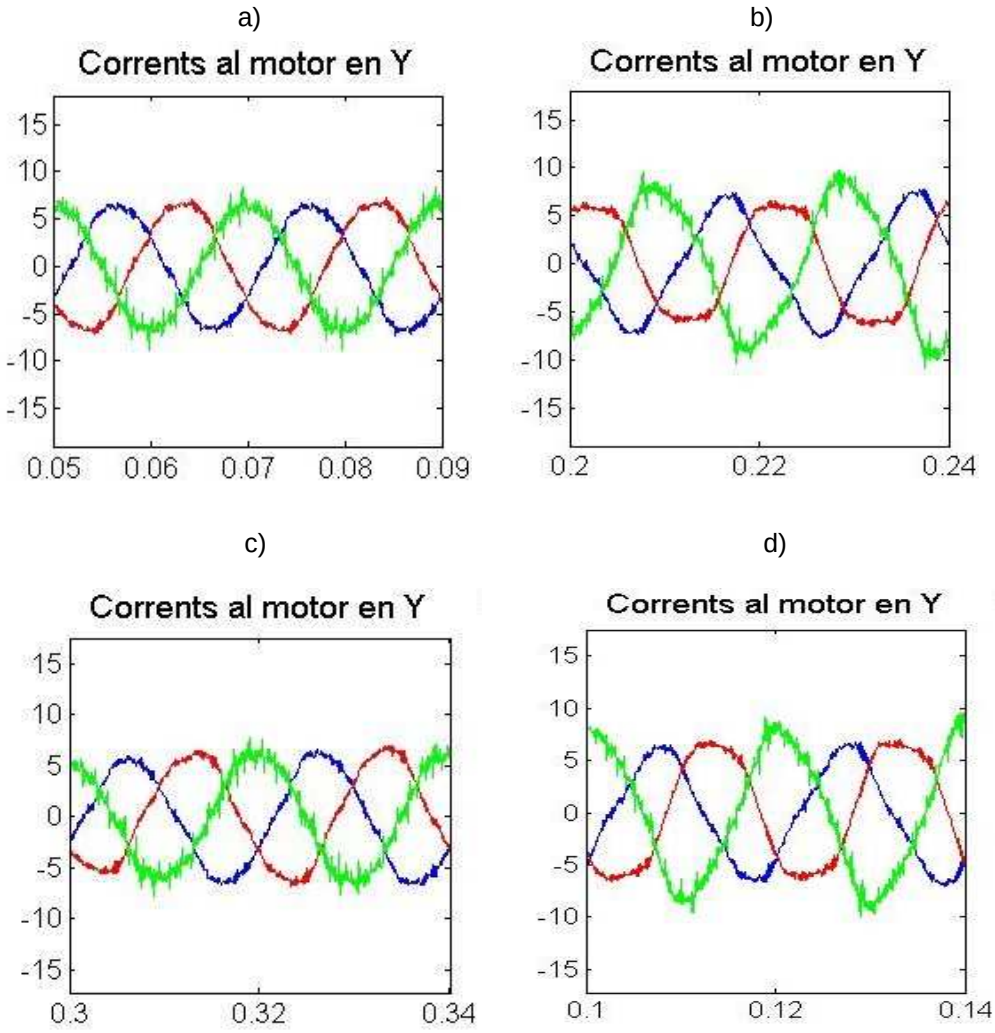


Figura 5.12: Senyals de corrent d'alimentació del motor dels assajos 1 i 2, en els intervals: a) I_{e1}, b) I_{s1}, c) I_{e2} i d) I_{s2}.

5.4.3. Càlcul i anàlisi dels desfasaments

L'anàlisi dels desfasaments és un altre dels punts que certifica el correcte funcionament del rectificador AFE. Pel càlcul dels desfasaments caldrà mesurar els instants d'algun punt característic dels senyals de tensió i corrent. A partir d'aquests punts es calcularan els desfasaments temporal. Després es convertiran a desfasaments en graus sexagesimals utilitzant l'equació 4.2., i es calcularan els coeficients de potència corresponents.

Per extreure els punts característics de cada interval s'utilitzaran els gràfics de la figura 5.13, els quals són una ampliació de les aproximacions dels senyals de tensió i corrent presentades en el capítol anterior.

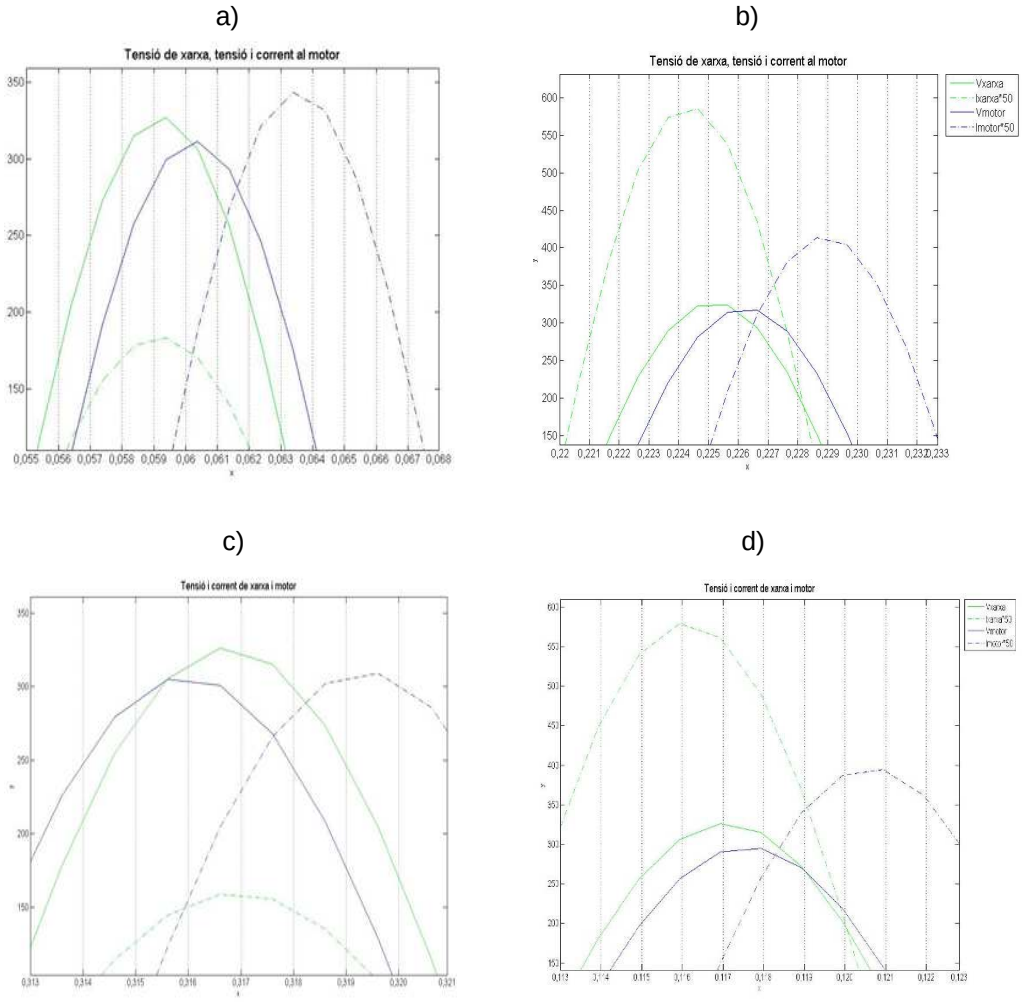


Figura 5.13: Ampliació de l'aproximació per Fourier dels senyals de tensió i corrent a la xarxa i al motor dels assajos 1 i 2, en els intervals: a) Ie1, b) Is1, c) Ie2 i d) Is2.

A continuació en les taules a), b), c) i d) del conjunt de taules 5.2 es mostren els instants característics i el càlcul dels desfasaments de cada interval estudiat.

a)

Interval 0,05-0,09s	
Instants de valors màxims	
Vxarxa	0,0593
Ixarxa	0,0593
Vmotor	0,0603
Imotor	0,0633

Càlcul dels desfasaments				
Senyals		t_d	φ	cos(φ)
Vxarxa	Ixarxa	0	0	1,0000
Vmotor	Imotor	0,003	54	0,5878
Vxarxa	Vmotor	0,001	18	0,9511

b)

Interval 0,20-24s	
Instants de valors màxims	
Vxarxa	0,2252
Ixarxa	0,2242
Vmotor	0,2263
Imotor	0,2289

Càlcul dels desfasaments				
Senyals		t_d	φ	cos(φ)
Vxarxa	Ixarxa	0,001	18	0,9511
Vmotor	Imotor	0,0026	46,8	0,6845
Vxarxa	Vmotor	0,0011	19,8	0,9409

c)

Interval 0,30-0,34s	
Instants de valors màxims	
Vxarxa	0,3166
Ixarxa	0,3166
Vmotor	0,3156
Imotor	0,3196

Càlcul dels desfasaments				
Senyals		t_d	φ	cos(φ)
Vxarxa	Ixarxa	0	0	1,0000
Vmotor	Imotor	0,004	72	0,3090
Vxarxa	Vmotor	-0,001	-18	0,9511

d)

Interval 0,10-0,14s	
Instants de valors màxims	
Vxarxa	0,117
Ixarxa	0,118
Vmotor	0,1179
Imotor	0,1209

Càlcul dels desfasaments				
Senyals		t_d	φ	cos(φ)
Vxarxa	Ixarxa	-0,001	-18	0,9511
Vmotor	Imotor	0,003	54	0,5878
Vxarxa	Vmotor	0,0009	16,2	0,9603

Taules 5.2: Mesures dels punts característics i càlcul dels desfasaments dels assajos 1 i 2, en els intervals: a) I_{e1}, b) I_{s1}, c) I_{e2} i d) I_{s2}.

En els dos sots, els desfasaments entre la tensió i el corrent de la xarxa és de 0º en I_e i de 18º en I_s. Aquests desfasaments fan que el factor de potència sigui molt proper a 1. D'aquesta manera es minimitza la energia reactiva. Els coeficients de potència dels intervals I_e està per sobre del factor de potència límit que comporta una penalització, en la factura elèctrica. El factor de potència de l'interval I_s comportaria una penalització, però considerant que la duració és inferior a 1s, no té una importància rellevant.

Els desfasaments entre la tensió el corrent del motor són elevats i els factors de potència obtinguts, en els quatre intervals analitzats són inferiors al factor de potència nominal. Això, però, no és un paràmetre que depengui de la font d'alimentació, si no del rang de potència en el que està treballant el motor.

La potència i el corrent nominal del motor és de 4kW i la potència consumida en els intervals I_e està sobre els 2kW, el que representa que està treballant al 50% de la seva potència nominal. Conseqüentment el factor de potència del motor serà inferior al factor de potència nominal.

Finalment, comentar els desfasament entre el senyal de tensió de la xarxa i el del motor són inferiors als 20º sexagesimals. Tot i això, aquest desfasament no hauria de ser un paràmetre negatiu, ja que l'intercanvi de potència entre el rectificador i el motor es fan a través del bus de continua.

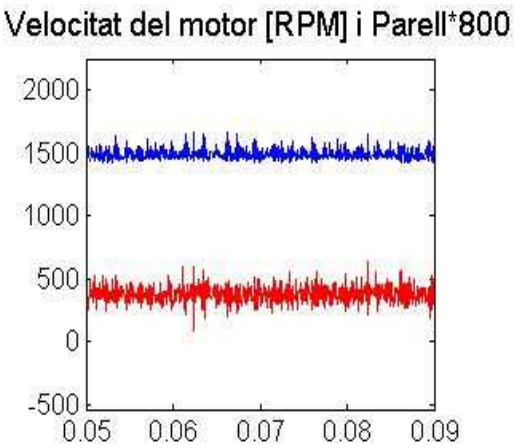
5.4.4. Comprovació dels senyals de velocitat i parell

Ara es comprovarà que el motor estigui girant a la velocitat de sincronisme (1500 rpm) i el parell que està desenvolupant el motor en el seu eix. Aquests dos senyals s'han representat en un únic gràfic (figura 5.14). Per fer-ho s'ha representat el parell multiplicat per 800, per tal de poder utilitzar un únic eix d'ordenades.

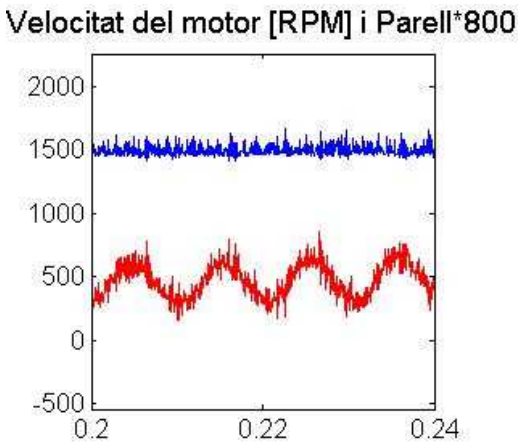
La velocitat de gir en tots els intervals estudiats és pròxima a les 1500 rpm, tal com s'indica en la placa de característiques del motor. Aquesta velocitat es correspon amb la velocitat de sincronisme del motor d'inducció de 4 pols escollit. La variació de velocitat entre els intervals I_e i I_s és inapreciable tot i el sot de tensió.

El parell augmenta lleugerament en els intervals I_s, ja que en les mesures dels gràfics s'ha comprovat que en els intervals I_e el parell està sobre els 0,4 Nm, mentre que en els intervals I_s és d'aproximadament 0,55Nm. A més, el parell mesurat en els intervals I_s no és tant regular com en els interval I_e.

a)



b)



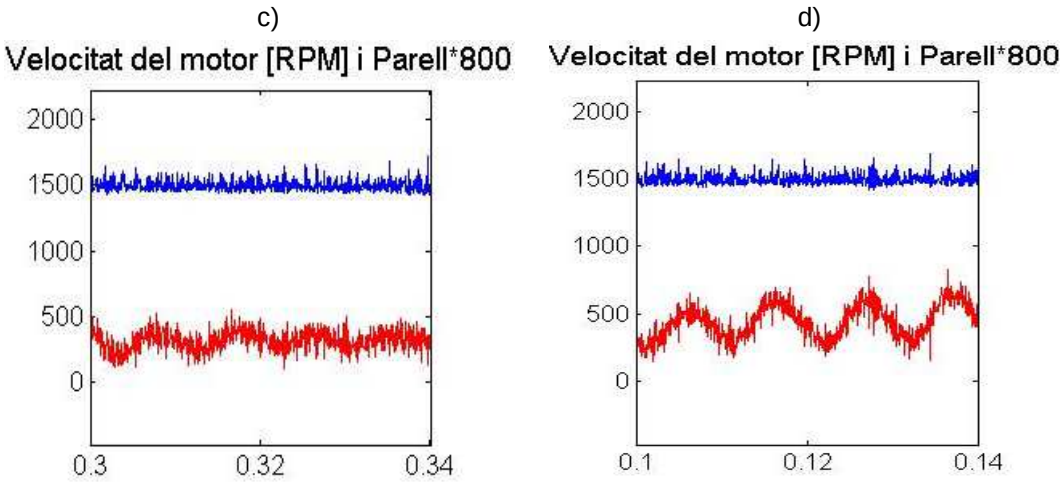


Figura 5.14: Senyals de velocitat de gir i parell dels assajos 1 i 2, en els intervals: a) I_{e1}, b) I_{s1}, c) I_{e2} i d) I_{s2}.

5.4.5. Anàlisi de les potències calculades

Per poder analitzar les potències s'han representat gràficament les potències instantànies calculades amb les tensions i corrents. Les potències que s'analitzaran corresponen a les potències on s'han mesurat experimentalment tensions i corrents (figures 5.15, 5.16 i 5.17).

En l'anàlisi de potències apareixen algunes discrepàncies entre els intervals I_e. En canvi la potència consumida en els intervals I_s es manté constant al voltant dels 2,9 kW. La potència consumida en el motor i entrega a l'eix d'aquest també són molt semblants en els intervals I_{s1} i I_{s2}, essent aquestes pròximes als 2kW i 1,8kW respectivament.

Les potències en els intervals I_e dels assajos 1 i 2, no es pot afirmar que siguin iguals en l'interval, ja que les diferencies superen en alguns casos els 500W. Aquestes importants diferències poden ser degudes a la posició respecte el sot d'aquests intervals, ja que mentre que l'interval I_{e1} és previ al sot de tensió, l'interval I_{e2} és posterior al sot. A més, l'interval $I_{e1.2}$ està a només 0,01s del final del sot, el que podria suposar que el sistema encara estigués en règim transitori i que per tant, aquest encara no hagués assolit condicions de règim estacionari funcionant de forma equilibrada.

Així doncs, només es considerarà que treballa en règim estacionari, alimentat per una font trifàsica equilibrada, l'interval I_{e1}. Per tant, es consideraran que les potències en I_e són les següents: la potència consumida de la xarxa és de 1870W, la potència consumida pel motor és de 1780W i la potència generada en l'eix del motor és de 1500W.

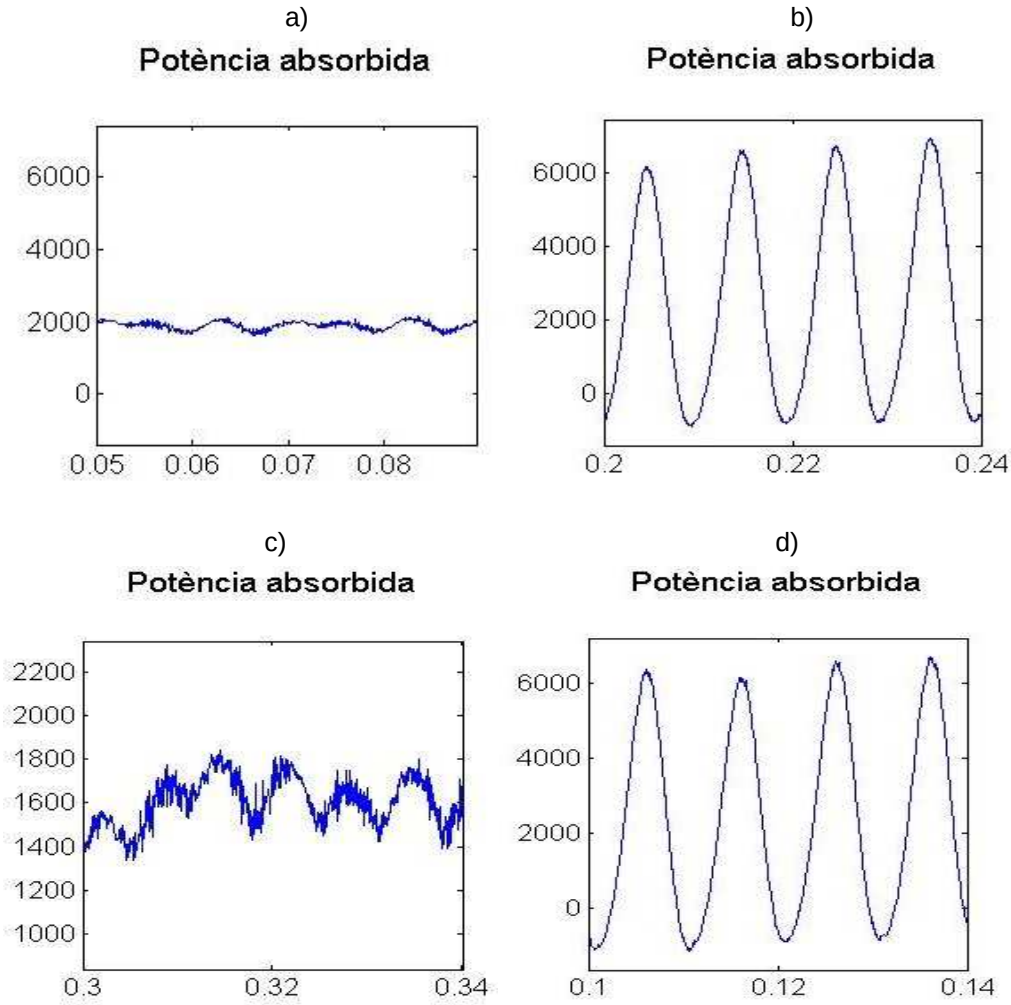
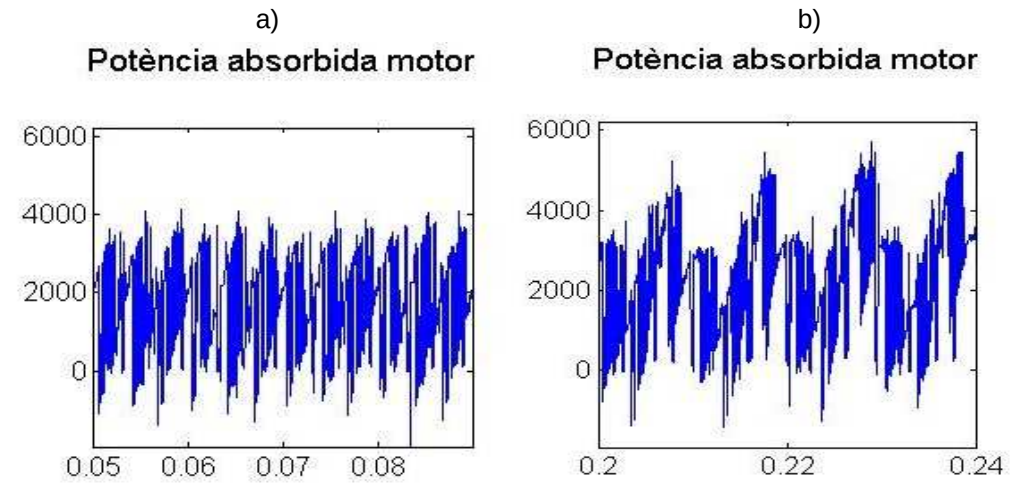


Figura 5.15: Senyals de potència activa instantània consumida de la xarxa dels assajos 1 i 2, en es intervals: a) I_{e1}, b) I_{s1}, c) I_{e2} i d) I_{s2}.



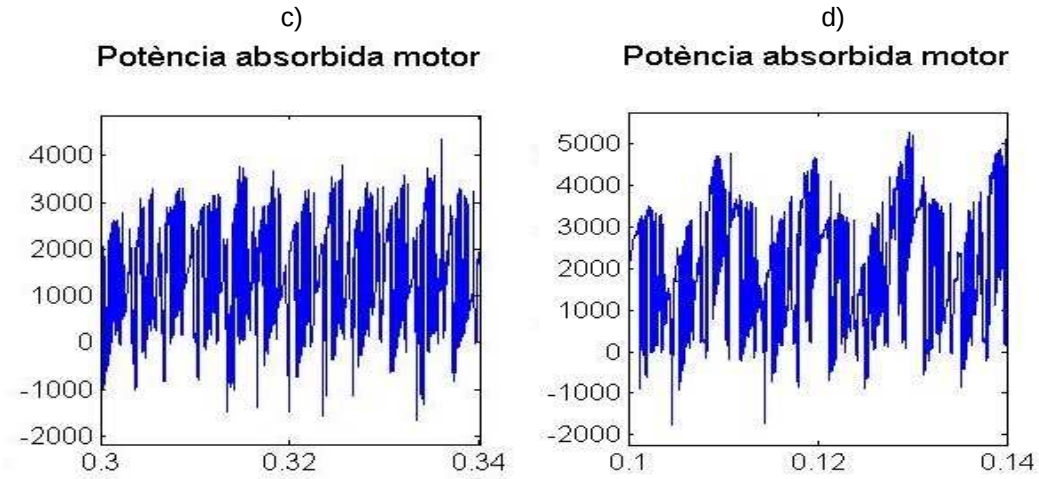


Figura 5.16: Senyals de potència activa instantània consumida pel motor dels assajos 1 i 2, en es intervals: a) I_{e1}, b) I_{s1}, c) I_{e2} i d) I_{s2}

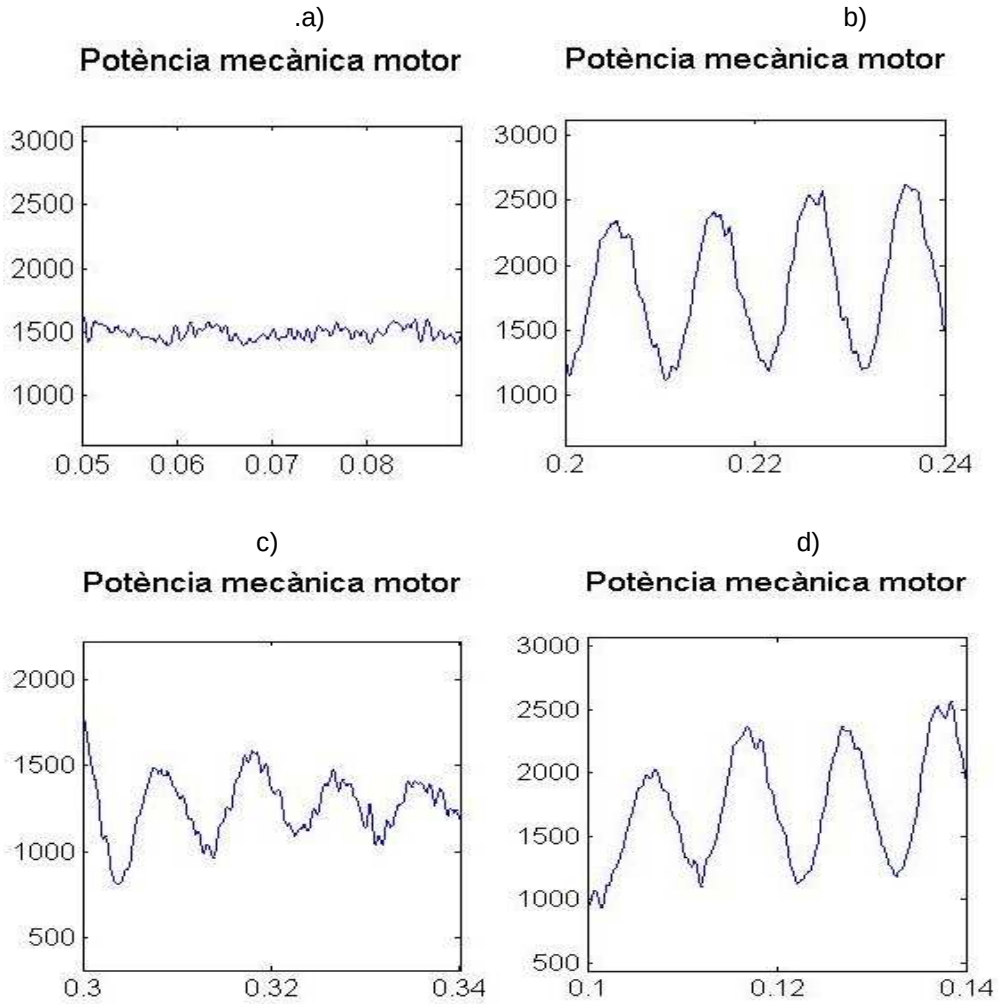


Figura 5.17: Senyals de potència mecànica dels assajos 1 i 2, en es intervals: a) I_{e1}, b) I_{s1}, c) I_{e2} i d) I_{s2}.

5.4.6. Càlcul i anàlisi dels rendiments

Els rendiments tenen una relació directa amb les potències, ja que s'han calculat a partir de les potències instantànies mitges de cada interval. Els rendiments calculats són: el total, el del rectificador AFE i el del motor (Taules 5.3 i 5.4).

Pel càlcul del rendiment total s'han utilitzat les potències mitges absorbides de la xarxa i en l'eix del motor. El rendiment del conjunt AFE s'ha calculat incloent-hi els següents elements: rectificador actiu, bus DC i inversor. Per tant, el rendiment de l'AFE s'ha calculat utilitzant les potències absorbides de la xarxa i les potències consumides pel motor. Finalment s'ha calculat el rendiment del motor utilitzant les potències absorbides pel motor i les potències entregades a l'eix d'aquest.

ASSAIG 1		
Conjunt/Element	**Interval**	**Rendiment**
Total	I_e	80,12 %
	I_s	61,63 %
AFE	I_e	94,88 %
	I_s	70,19 %
Motor	I_e	84,45 %
	I_s	87,81 %

Taula 5.3: Rendiments totals, de l'AFE i el motor de l'Assaig 1.

ASSAIG 2		
Conjunt/Element	**Interval**	**Rendiment**
Total	I_e	46,92 %
	I_s	61,53 %
AFE	I_e	61,39 %
	I_s	71,48 %
Motor	I_e	76,43 %
	I_s	86,09 %

Taula 5.4: Rendiments totals, de l'AFE i el motor de l'Assaig 2.

Així doncs, els rendiments dels intervals I_{s1} i I_{s2} seran igual i valdran: el rendiment total és del 61,5%, el rendiment del rectificador AFE també són molt propers i estan al voltant del 70% i el rendiment del motor serà pròxim al 87%.

Els rendiments de l'interval I_e es calcularan a partir de les potències de l'interval I_{e1}, ja que les potències de l'interval s'han desestimat. Així doncs, els rendiments quan s'alimenta el rectificador de forma equilibrada són els de la taula 5.3.

Si s'analitzen els rendiments obtinguts en els intervals I_e i I_s es pot observar, que la diferència entre el rendiment total de l'interval I_e i I_s és d'aproximadament un 20%. Si es fa el mateix amb els rendiments de l'AFE, es pot comprovar com el

descens del rendiment entre l'interval equilibrat i en el que es produeix el sot, també és del 20%. Així doncs, es pot concloure que el descens del rendiment total del sistema és degut al descens del conjunt AFE i aquest ha estat provocat de forma directa pel sot de tensió.

6. Estudi experimental de l'AFE en mode regeneratiu

En aquest capítol s'ha fet l'estudi del rectificador AFE treballant en mode regeneratiu o de recuperació d'energia. Aquest estudi pretén estudiar els senyals dels conjunt experimental quan es retorna energia a la xarxa i la quantitat d'energia recuperada en l'aturada del motor. Després es faran les corresponents valoracions econòmica i ambiental del rectificador AFE treballant en mode regeneratiu.

6.1. Introducció

En aquest capítol s'estudiarà la propietat de treballar bidireccionalment, que fa especial el rectificador AFE. Aquesta característica fa que gràcies al control actiu, el rectificador AFE pugui modificar la commutació dels interruptors, per tal d'adequar-la a les necessitats de la càrrega. Així doncs, quan la càrrega en comptes de consumit energia, retorna energia, el rectificador AFE també pot retornar energia a la font principal.

En els assajos presentats en aquest capítol s'estudiarà el comportament del rectificador AFE alimentant un motor d'inducció de gàbia d'esquirol. La particularitat dels assajos, però, és que l'instant estudiat serà el transitori en que el rectificador AFE actua d'inversor, des de la desconnexió del motor fins ala seva aturada.

A continuació es farà una introducció del mode regeneratiu del rectificador AFE. En aquest apartat s'explicarà com treballa el rectificador AFE en aquest mode i les particularitats d'aquest.

Tot seguit es mostraran els resultats dels assajos d'aturada del motor en dos situacions de treball diferents. En l'Assaig 3 el motor treballa alimentant el motor de gàbia d'esquirol en buit i en l'Assaig 4 el motor treballa desenvolupant parell en l'eix.

6.2. Mode regeneratiu

El mode regeneratiu consisteix en el mode de funcionament, en el que el rectificador AFE treballa com a inversor. Aquest és el mode de funcionament invers al funcionament com a rectificador, això vol dir, que en aquest mode de treball el rectificador AFE ondula contra la xarxa.

Per ondular contra la xarxa el rectificador ha de seguir mantenint el mateix senyal de tensió per evitar les distorsions de la font principal, ja que habitualment la font AC és la xarxa elèctrica pública. Així doncs, per poder treballar tornant energia a la xarxa el rectificador a de generar un corrent desfasat 180º, el que significa un factor de potència de -1 (Figura 6.1). D'aquesta manera és com el rectificador AFE aconsegueix retornar potència a la font principal. A més, cal procurar que el coeficient de potència sigui el més proper a -1, per evitar la generació de potència reactiva.

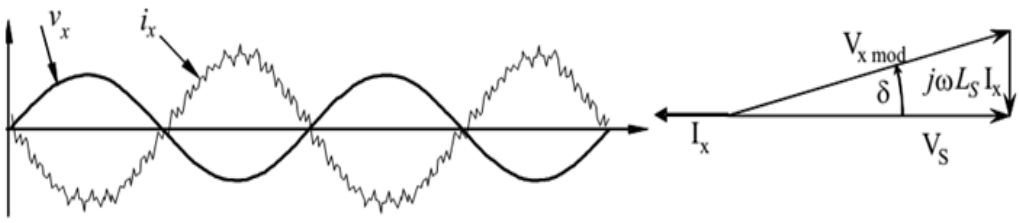


Figura 6.1: Tensions, corrents

Aquest mode de funcionament és especialment interessant en instal·lacions on hi puguin existir retorns d'energia. Aquest retorn d'energia pot provenir des de font de generació alternatives com són energies renovables, com de motors que actuen de fre o aprofitant la inèrcia i que en moments determinats treballen com a generadors.

6.3. Resultats dels assajos de l'AFE en mode regeneratiu

En aquest apartat es presenten els resultats dels assajos 3 i 4. Els assajos que es presenten a continuació corresponen als instants d'atura del motor, treballant en dos estats de càrrega diferents. En l'Assaig 3 s'han capturat els senyals de l'instant

d'aturada, quan el motor treballa en buit, i en l'Assaig 4 els senyals, quan el motor treballa desenvolupant un parell a l'eix motor.

En aquests dos assajos es farà l'anàlisi del rectificador AFE treballant en mode regeneratiu, és adir, retornant energia a la xarxa. A més, també es vol fer l'estudi comparatiu entre el retorn d'energia quan el motor treballa en buit i quan aquest ho fa amb càrrega.

A continuació, es presenten en forma gràfica els resultats dels assajos 3 i 4, els quals representen respectivament els estats de treball en buit i amb càrrega. Tot i això, aquests resultats no són únics, ja que en l'ANNEX A es presenten tots els resultats obtinguts. En l'ANNEX A es poden trobar tres assajos amb el motor treballant en buit i tres assajos amb el motor treballant amb càrrega.

Els resultats presentats en l'ANNEX A s'han utilitzat com a informació de suport i contrast. D'aquesta manera els resultats obtinguts no són fruit d'un sòl experiment, si no, la conjunció dels diferents resultats obtinguts en els diferents assajos.

6.3.1. Assaig 3: Resultats en mode regeneratiu amb el motor treballant en buit

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts en el rectificador AFE alimentant el motor, quan aquest treballa en buit, i en l'instant d'aturada d'aquest motor.

En primer lloc es presenten les gràfiques corresponents a les dades mesurades, les quals tenen una duració de 0,5s (Figura 6.2). D'aquesta primera figura on es presenten els resultats generals, ja es poden extreure algunes característiques dels senyals quan el rectificador AFE treballa en mode regeneratiu.

- S'observa un pic de tensió en l'instant de parada.
- El corrent absorbit i el corrent en el motor presenten comportaments diferents en el transitori d'aturada.
- La velocitat decreix progressivament i el parell canvia de signe.
- En la potència absorbida i la mecànica es genera un pic i la potència del motor segueix la mateixa forma que el parell.

En les figures 6.3.2 i 6.3.3, també es presenten les aproximacions per Fourier, dels senyals de tensió i corrent de la xarxa i el motor. La utilització d'aquestes aproximacions és imprescindible per poder representar les tensions i els corrent, com un senyal sinusoïdal continu.

En l'anàlisi dels desfasaments serà necessari determinar punts característics d'aquests senyals, per poder calcular-ne els desfasaments. Així doncs, aquests gràfics s'utilitzaran en per determinar els desfasaments i els coeficients de potència a la font principal i en el motor.

En els figures 6.3.2 i 6.3.3, que representen els senyals de tensió i corrent en els intervals d'estudi de l'Assaig 3, també es poden observar algunes diferencies entre cada un dels intervals.

- L'amplitud del corrent, en l'interval en que funciona retornant energia a la xarxa, és superior que en l'interval de la figura 6.3.
- Tot i que l'amplitud dels senyals de corrent augmenten, no ho fan tan exageradament com quan es produeix un sot de tensió, en els assajos 1 i 2
- Els senyals de tensió i corrent de la xarxa en la figura 6.3, no semblen anar en fase, mentre que si que ho semblen el de la figura 6.4.

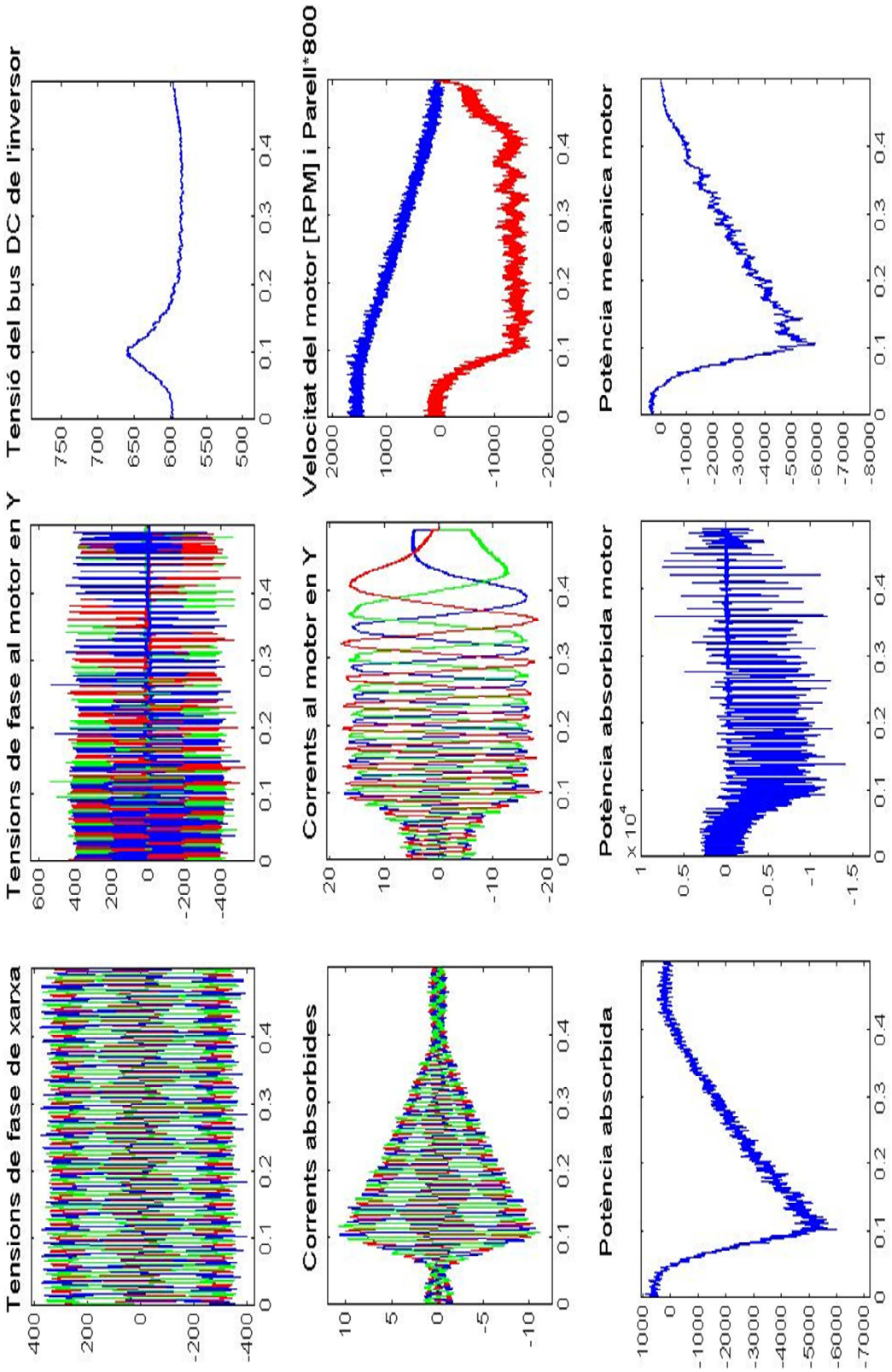


Figura 6.2: Tensions, corrents, velocitat, parell i potències en un interval de 0,5s, el qual compren l'instant d'aturada del motor treballant en buit (Assaig 3).

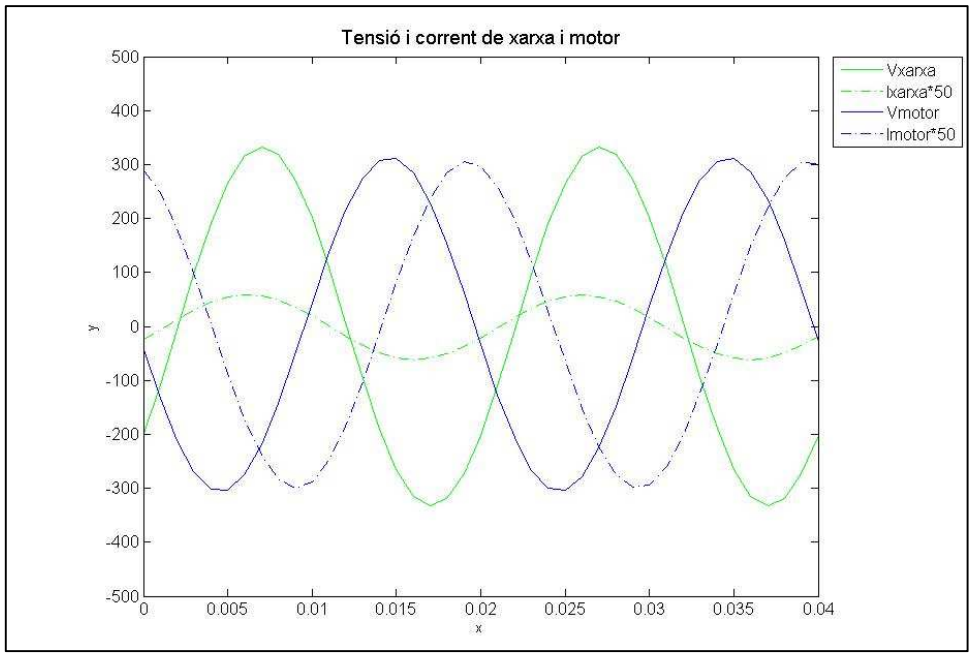


Figura 6.3: Tensions i corrents de la font principal i a la càrrega d'una única fase, en l'interval 0,00-0,04.

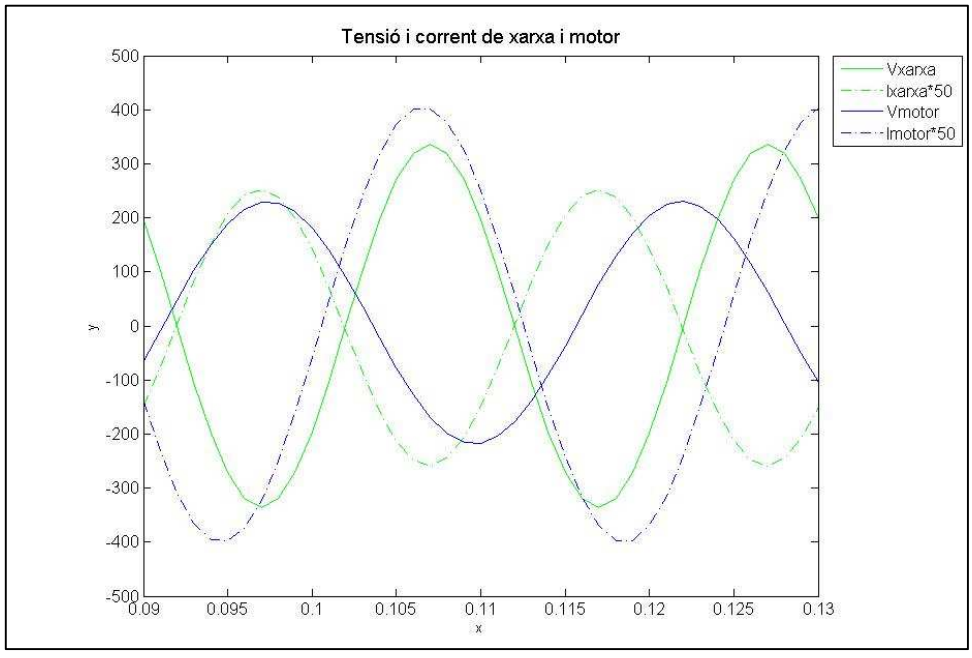


Figura 6.4: Tensions i corrents de la font principal i a la càrrega d'una única fase, en l'interval 0,09-0,13.

6.3.2. Assaig 4: Resultats en mode regeneratiu amb el motor treballant amb càrrega

En aquest apartat, es presenten els resultats obtinguts en l'assaig del rectificador AFE alimentant un motor d'inducció treballant amb càrrega, i els senyals en l'instant d'aturada d'aquest motor.

En primer lloc es presenten les gràfiques corresponents a les dades mesurades, les quals tenen una duració de 0,5s (figura 6.5). En els resultats obtinguts en aquesta figura, on es mostren totes les dades recollides. Tot seguint s'enumeren algunes característiques generals dels senyals capturats.

- La tensió de la font principal es manté constant en tot moment, sense patir canvis significatius.
- El corrent de la font principal tendeix a zero en l'instant d'aturada i després torna créixer superant els valors de quan treballa de forma constant. Després disminueix de forma progressiva.
- La tensió i el corrent del motor van augmentant el període, però sense disminuir l'amplitud dels senyals fins el moment en el que el motor deixa de girar.
- En el bus de continua es genera un pic, d'una durada de mig cicle (0,01s), i tot seguit torna a prendre el valor de referència.
- La reducció de la velocitat és progressiva fins en que el motor deixa de girar, però el parell canvia de sentit i es manté constant durant 0,02s, el que és un cicle, i a continuació decreix fins a fer-se zero.
- La potència mecànica i la potència absorbida canvien de sentit en el moment que s'apaga el motor, passant d'absorbir potència a injectar-ne a l'eix del motor i a la font principal respectivament.
- La potència en el mort, canvia de sentit com en el parell i es manté constant durant aproximadament un cicle i després decreix fins a zero.

Com s'ha fet en l'Assaig 3, en les figures 6.3.5 i 6.3.7 es presenten les senyals aproximades per Fourier, de les mesures de tensió i corrent de la xarxa i el motor. Aquestes figures s'utilitzaran pel càlcul dels desfasaments i només s'hi representa una fase de la tensió i el corrent. Algunes característiques destacables d'aquests senyals són:

- L'amplitud dels senyals de corrent en l'instant d'aturada creix de forma més acusada, que en l'Assaig 3.
- Els senyals de tensió i corrent semblen seguir el mateix patró, que els senyals de l'Assaig 3.

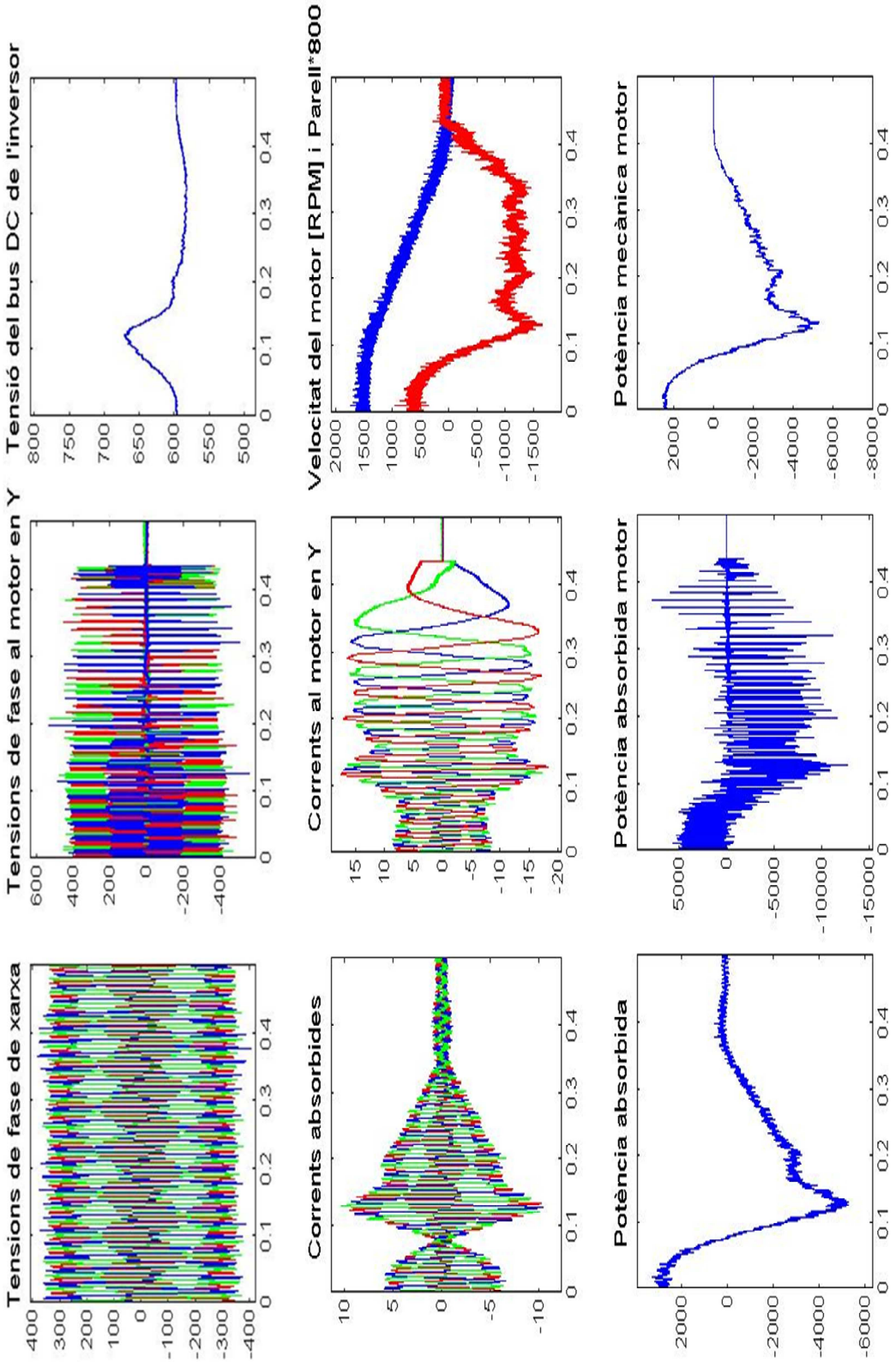


Figura 6.5: Tensions, corrents, velocitat, parell i potències en un interval de 0,5s , el qual compren l'instant d'aturada del motor treballant amb càrrega (Assaig 4).

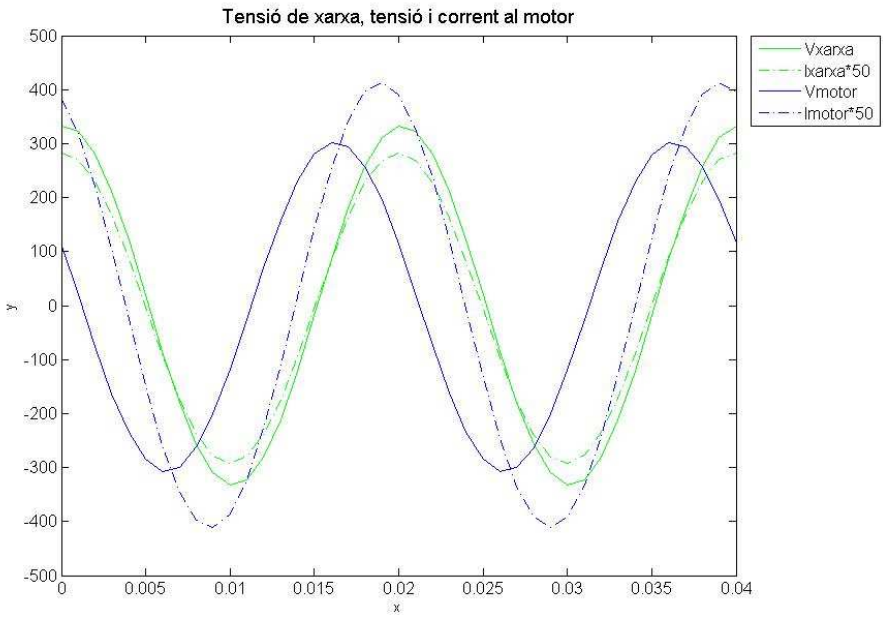


Figura 6.6: Tensions i corrents de la font principal i a la càrrega d'una única fase, en l'interval 0,00-0,04.

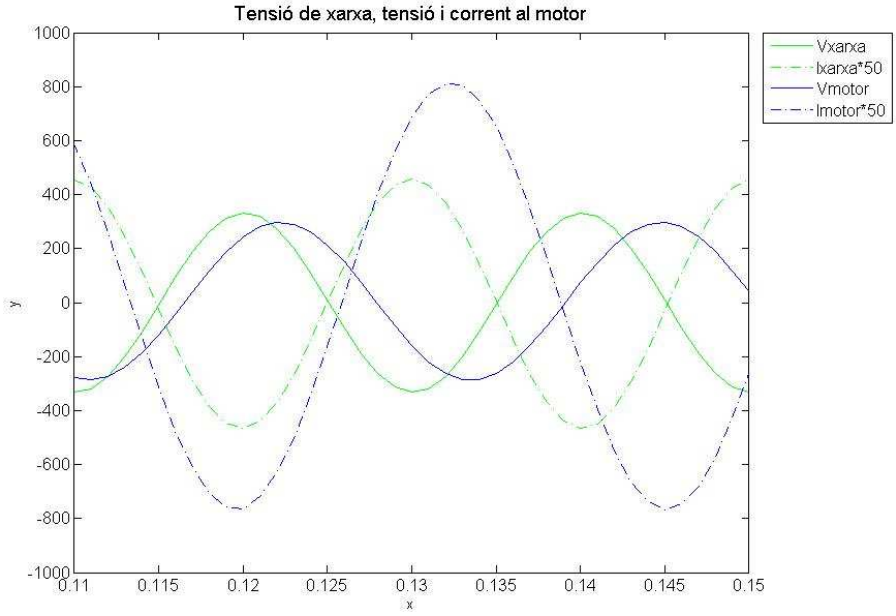


Figura 6.7: Tensions i corrents de la font principal i a la càrrega d'una única fase, en l'interval 0,11-0,15.

6.4. Avaluació dels resultats de l'AFE treballant en mode regeneratiu

En aquest apartat s'estudiaran els resultats obtinguts en els assajos 3 i 4, en els que s'ha estudiat l'instant d'aturada del motor. La diferència entre un i l'altre és que en l'Assaig 3 s'ha estudiat el motor treballant en buit, i en canvi en l'Assaig 4 el motor treballa desenvolupant un parell en l'eix motor.

A continuació es farà l'anàlisi comparatiu dels resultats. Per avaluar la capacitat regenerativa del motor en aquests dos casos, s'analitzaran els senyals en els dos tipus intervals. En primer lloc s'analitzaran els intervals en que el sistema AFE treballa alimentant el motor mitjançant una font trifàsica equilibrada. Després s'analitzarà l'interval transitori des de que s'apaga l'alimentació del motor fins que aquest s'atura. D'aquesta manera es podrà comparar els consums en règim de funcionament estable, treballant com a rectificador, amb l'energia recuperada en l'instant d'aturada, treballant com a inversor.

Per estudiar el funcionament en mode regeneratiu s'analitzaran els senyals de tensió i corrent de la font principal i del motor. A més, també es valorarà la tensió del bus DC en cada interval. Després es farà l'anàlisi de potències i rendiments en mode regeneratiu per comprovar el rendiment dels diferents elements que formen el sistema estudiat. Finalment es farà un càlcul de l'energia recuperada en l'aturada del motor i la magnitud d'aquesta.

Abans de començar l'avaluació del resultats en la taula 6.1 es mostra la nomenclatura utilitzada per anomenar els diferents intervals. El subíndex e correspon en l'interval en que treballa com a rectificador alimentat amb una font trifàsica equilibrada, i el subíndex ta correspon al transitori d'aturada.

Assaig	Interval [s]	Nomenclatura
3	0,00 – 0,04	I_{e3}
	0,09 – 0,13	I_{ta3}
4	0,00 – 0,04	I_{e4}
	0,11 – 0,15	I_{ta4}

Taula 6.1: Nomenclatura per la definició dels intervals dels assajos 3 i 4.

6.4.1. Anàlisi dels senyals de tensió

La tensió de la xarxa és un dels paràmetres que s'han de mantenir el més invariables possibles, és a dir, mantenir la forma sinusoïdal i un valor eficaç pròxim als 230V. D'aquesta manera s'evitarà la generació d'harmònics i alteracions en l'amplitud, que podria ocasionar danys en altres equips. A més, la tensió es la senyal utilitzada com a referència i per tant es considera invariable, per tant en un cas ideal no hauria de canviar de forma ni de fase.

Les tensions de xarxa en els intervals I_e mantenen una forma sinusoïdal sense deformacions apreciables i el seu valor eficaç és molt pròxim als 230V (Figura 6.8 a) i c)). En els intervals I_{ta} la tensió de xarxa la forma continua essent sinusoïdal, tot i que treballant en buit i amb càrrega s'ha mesurat en lleuger augment del valor eficaç, pròxim al 4% del valor nominal (figura 6.8 b) i d)). A més, en tots els intervals els senyal mantenen una forma sinusoïdal i un desfasament entre fases de 120º.

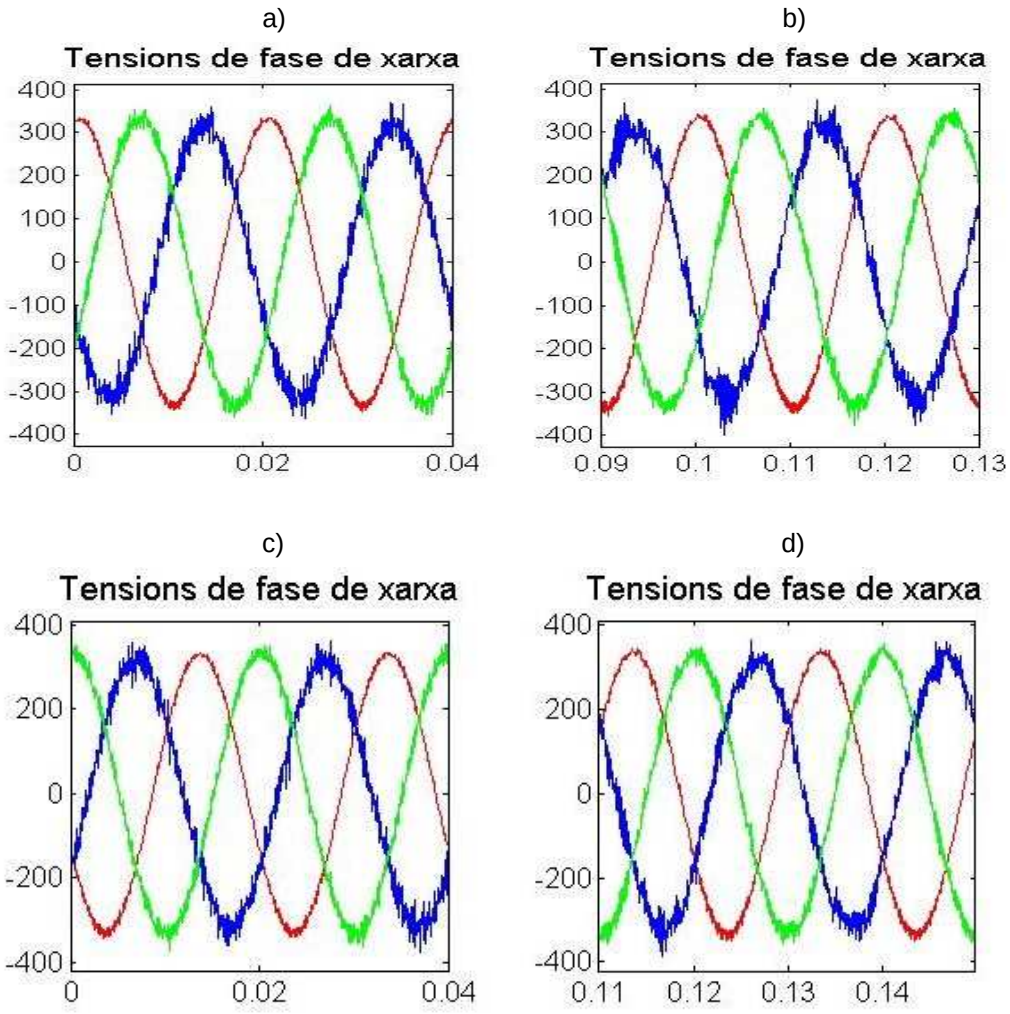


Figura 6.8: Senyals de tensió de xarxa dels assajos 3 i 4, en es intervals: a) I_{e3}, b) I_{ta3}, c) I_{e4} i d) I_{ta4}.

Les tensions en el motor, s'han d'analitzar com a tensions generades per un inversor (PWM). Així doncs, es pot considerar que la tensió subministrada al motor és una tensió trifàsica equilibrada de valor eficaç de 400V.

En els intervals I_e la tensió es manté constant en 400V, en canvi en els intervals Ita en la tensió és discontinua. En els transitoris $I_{ta3\,i}$ I_{ta4} la tensió del motor dibuixa un patró regular en el que els senyals de caràcter pulsat, van passant de valer

400V a tenir un valor eficaç gairebé nul (figura 6.9). Així doncs, es pot veure com el motor no varia la seva tensió nominal de 400V a 415V, que com s'ha vist a la placa de característiques també és una de les tensions nominal en estrella del motor.

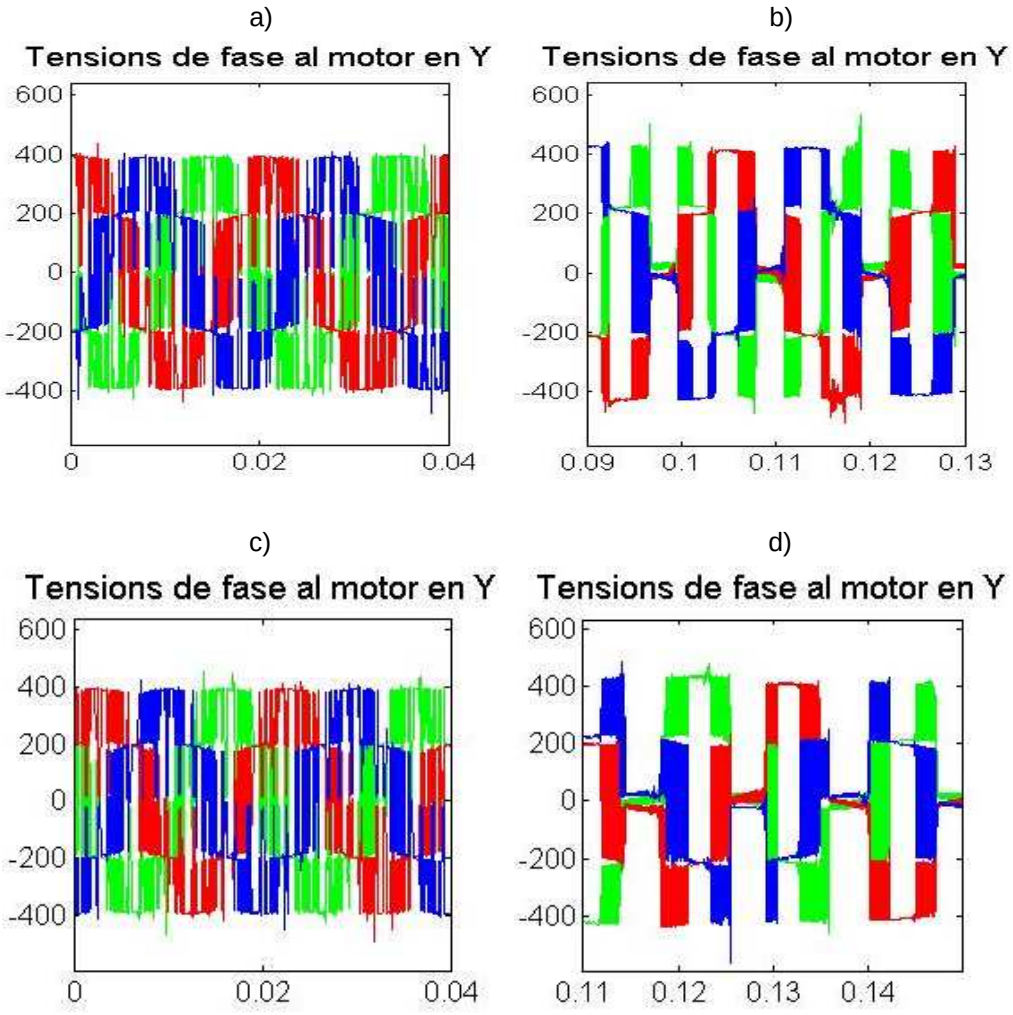


Figura 6.9: Senyals de tensió del motor dels assajos 3 i 4, en es intervals: a) I_{e3}, b) I_{ta3}, c) I_{e4} i d) I_{ta4}.

La tensió en el bus DC pateix un pic d'aproximadament 0,1s, que s'inicia en l'instant que s'apaga l'alimentació del motor. A part d'aquest pic ocasionat de forma transitòria, el valor de tensió del bus DC es manté molt pròxim al valor nominal de 598V, establert pel fabricant (figura 6.10).

La reacció del rectificador AFE, doncs, es pot observar en la rectificació d'aquest pic de tensió en el bus DC. Una de les premisses de funcionament del rectificador AFE, és la de mantenir la tensió de bus DC a un valor de referència constant. Per tant, en el mateix moment que la tensió continua comença a créixer, desviant-se

del valor de referència, el rectificador AFE començarà a modificar la commutació del transistors IGBTs per tal de restablir-la.

En la rectificació i manteniment de la tensió DC també es pot apreciar alguna diferència entre els assajos 3 i 4. La diferència més important és que un cop s'ha produït el pic de tensió el retorn a la tensió de referència no es produeix de forma idèntica en els dos assajos. En l'assaig 3 la rectificació de la tensió continua es fa de forma més suau amb una lleugera panxa, fins a assolir el valor de referència. En l'assaig 4, la rectificació és més tosca i apareix un tram constant entre el pic i la panxa anterior al restabliment de la tensió de referència.

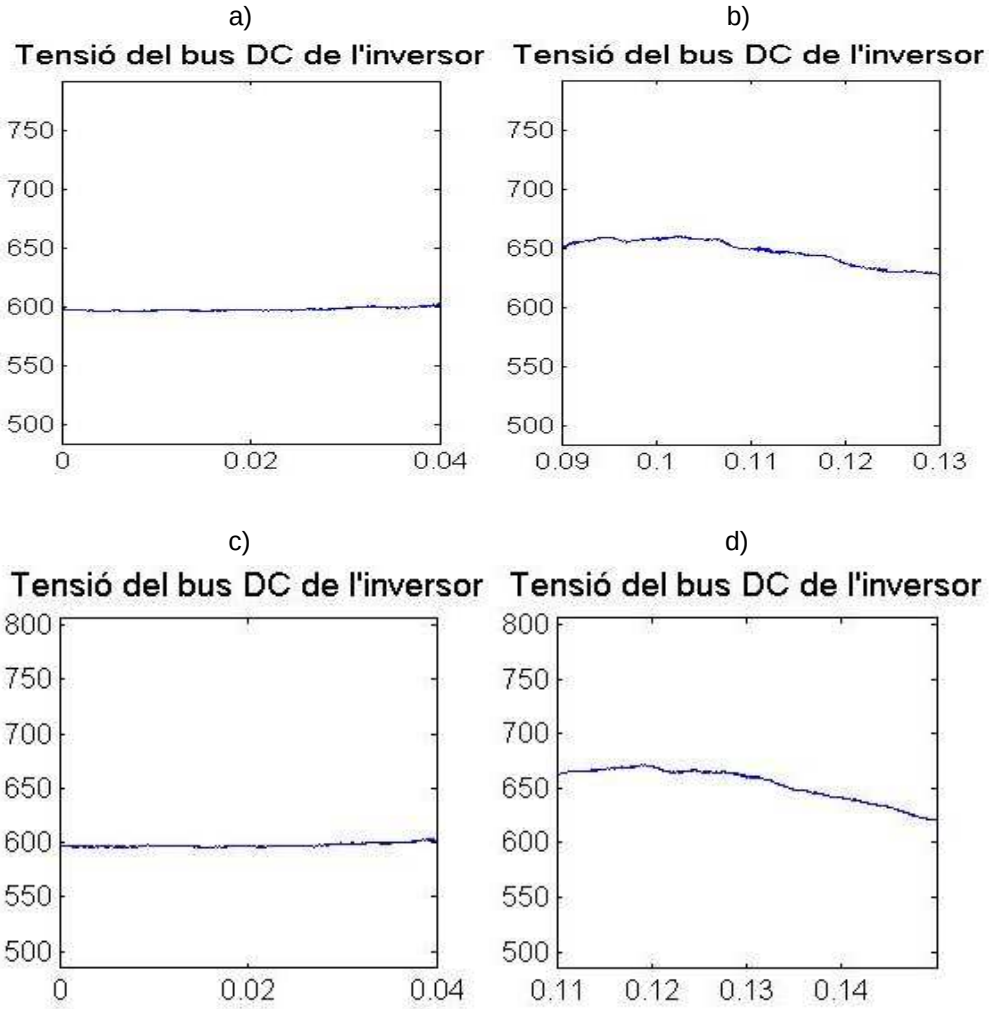


Figura 6.10: Senyals de tensió del bus DC dels assajos 3 i 4, en es intervals: a) I_{e3}, b) I_{ta3}, c) I_{e4} i d) I_{ta4}.

6.4.2. Anàlisi dels senyals de corrent

Els corrents tant a la xarxa com en el motor mantenen una forma sinusoïdal, exceptuant el corrent del motor en l'instant que es fa zero. A més, la única diferència lògica entre els corrents en els intervals I_{e3} i I_{e4} és la seva amplitud, ja que aquest és proporcional al parell desenvolupat en l'eix del motor i en l'assaig 3 es treballa en buit i en l'assaig 4 amb càrrega.

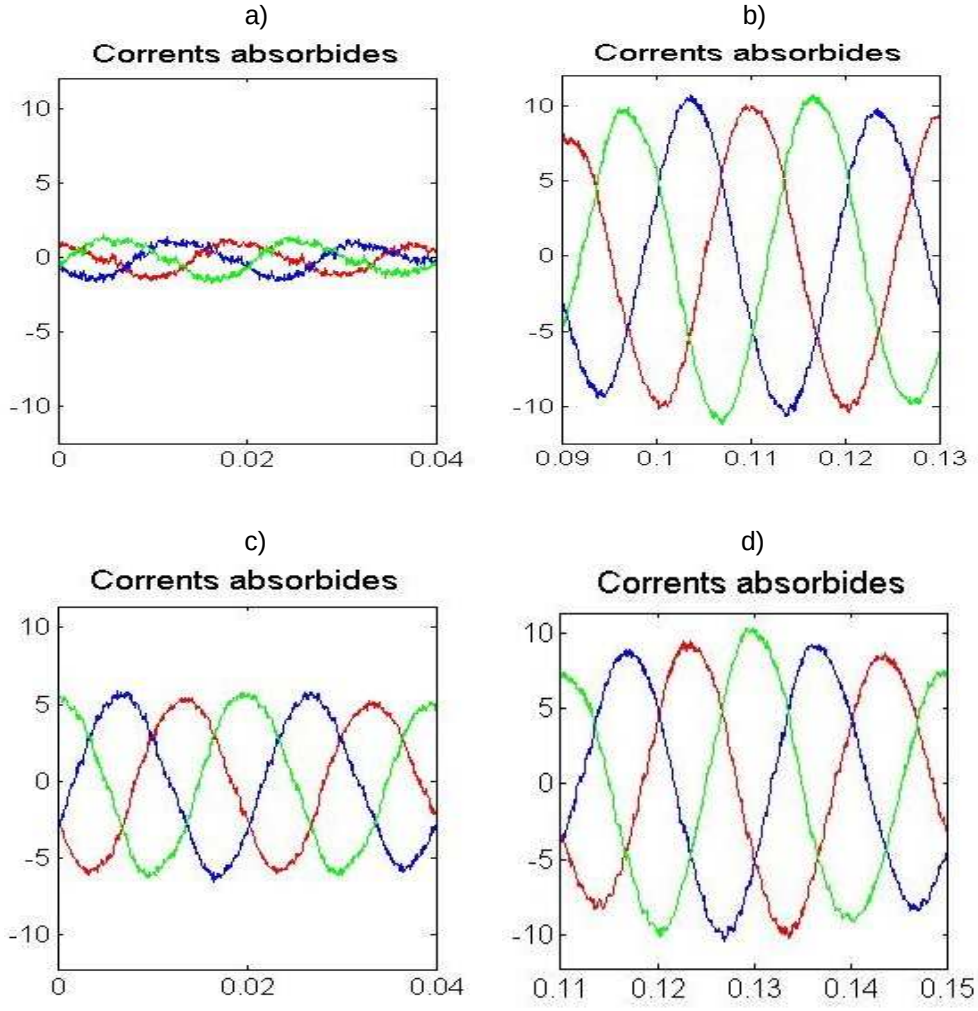


Figura 6.11: Senyals de corrent de xarxa dels assajos 3 i 4, en es intervals: a) I_{e3}, b) I_{ta3}, c) I_{e4} i d) I_{ta4}.

En segon lloc cal destacar un dels canvis més significatius, pel que fa al funcionament del conjunt, i és de la inversió del corrent. En els intervals I_e el corrent de la xarxa va en fase amb la tensió, el que implica un factor de potència pròxim a la unitat i per tant un consum de potència activa. En els intervals I_{ta} el corrent de la xarxa passa, en qüestió de centèsimes de segon, d'anar en fase a anar en

inversió de fase amb la tensió de xarxa. Aquest canvi, és el que fa que el rectificador AFE passi de funcionar com a rectificador a funcionar com a inversor.

Finalment, si s'analitza l'amplitud del corrent, no sols en l'interval I_{ta}, si no des de que s'apaga fins que s'atura, es podran observar diferències entre el corrent de xarxa i el del motor. En primer lloc el corrent del motor augmenta d'amplitud en el moment en que s'apaga el motor i aquesta es manté fins gairebé el moment en que s'atura. En l'interval I_{ta} el corrent augmenta per sobre les tensions nominals en estrella, però els valors màxims són pròxims als valors funcionant en triangle, pel que tampoc suposen un risc pels components del motor.

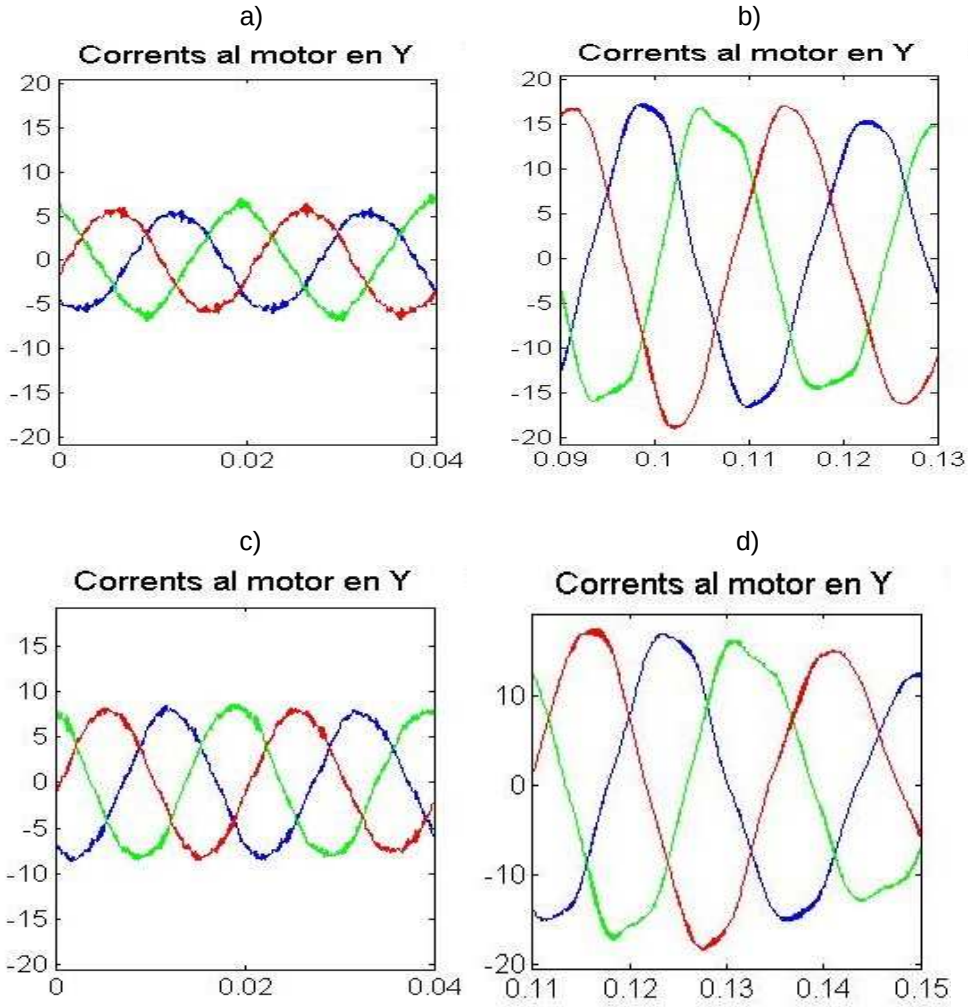


Figura 6.12: Senyals de corrent del motor dels assajos 3 i 4, en es intervals: a) I_{e3}, b) I_{ta3}, c) I_{e4} i d) I_{ta4}.

En canvi, el corrent de la xarxa disminueix la seva amplitud en el moment d'apagada com passaria de forma normal amb qualsevol font, però seguidament es crea un pic que supera l'amplitud amb la que treballava en l'interval I_e. Després

aquesta es va reduint de forma gradual fins el moment en que s'atura el motor. Tot i això, es pot veure que mentre que en l'Assaig 3 el decreixement és gairebé lineal i uniforme, en l'Assaig 4 hi ha un instant inferior a una dècima de segon, en la que el corrent de xarxa manté l'amplitud amb la que treballava en l'interval I_e.

6.4.3. Càlcul i anàlisi dels desfasaments

Els desfasaments aniran directament relacionats amb els canvis produïts en els corrents, comentats anteriorment. A més, el càlcul dels factors de potència, a partir dels desfasaments, permetran valorar la generació de potència reactiva en cada moment i el sentit de la potència activa.

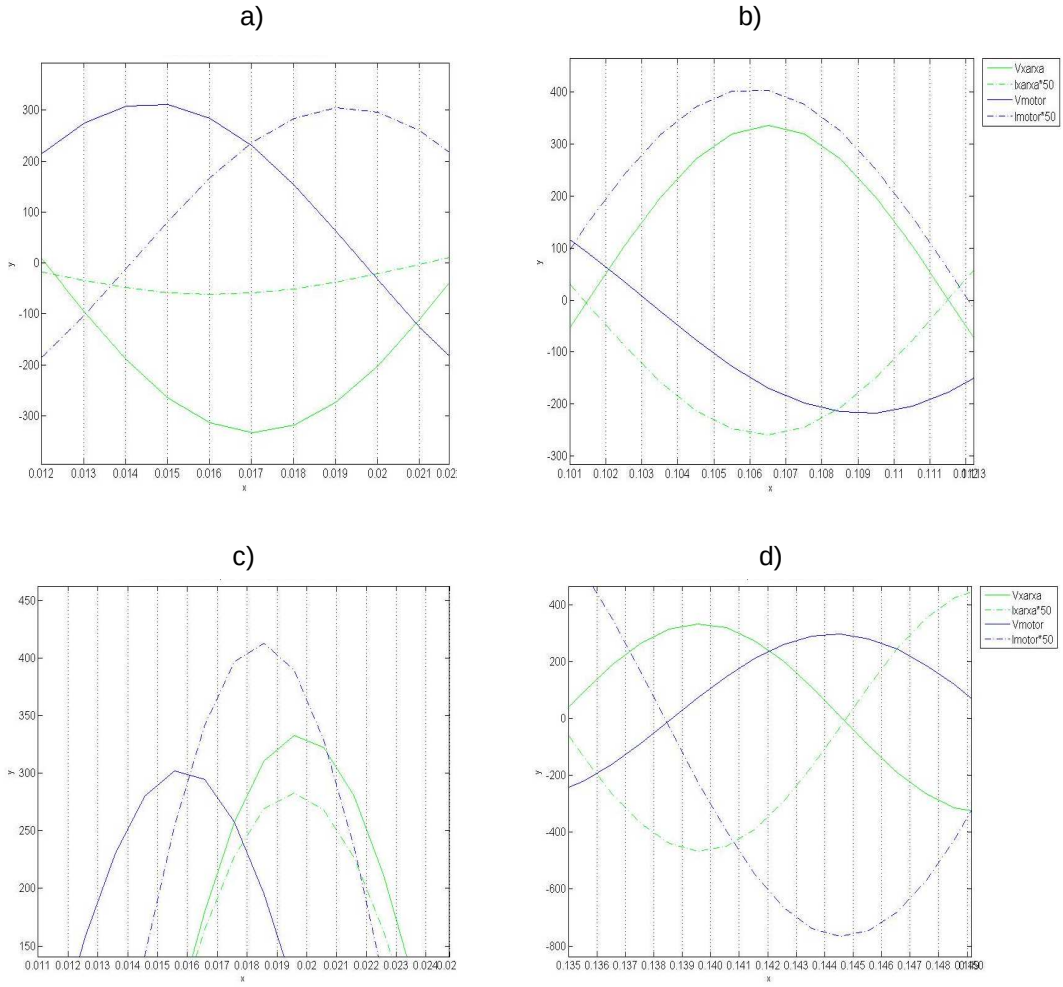


Figura 5.13: Ampliació de l'aproximació per Fourier dels senyals de tensió i corrent a la xarxa i al motor dels assajos 3 i 4, en els intervals: a) I_{e3}, b) I_{ta3}, c) I_{e4} i d) I_{ta4}.

A continuació en les taules a), b), c) i d) del conjunt de taules 6.2 es mostren els instants característics de cada senyal i interval. En el conjunt de taules 6.2 també

hi ha les taules respectives a les anteriors, en les que hi ha els valors de desfasaments calculats.

a)

Interval 0,00-0,04s	
Instants de valors màxims	
Vxarxa	0,0170 s
Ixarxa	0,0160 s
Vmotor	0,0150 s
Imotor	0,0190 s

Càlcul dels desfasaments				
Senyals		t_d	φ	cos(φ)
Vxarxa	Ixarxa	0,001	18	0,9511
Vmotor	Imotor	0,004	72	0,3090
Vxarxa	Vmotor	-0,002	-36	0,8090

b)

Interval 0,09-0,13s	
Instants de valors màxims	
Vxarxa	0,1065
Ixarxa	0,1165
Vmotor	0,106
Imotor	0,1195

Càlcul dels desfasaments				
Senyals		t_d	φ	cos(φ)
Vxarxa	Ixarxa	0,01	180	-1,0000
Vmotor	Imotor	0,0135	243	-0,4540
Vxarxa	Vmotor	-0,0005	-9	0,9877

c)

Interval 0,00-0,04s	
Instants de valors màxims	
Vxarxa	0,0195
Ixarxa	0,0195
Vmotor	0,0155
Imotor	0,0185

Càlcul dels desfasaments				
Senyals		t_d	φ	cos(φ)
Vxarxa	Ixarxa	0	0	1,0000
Vmotor	Imotor	0,003	54	0,5878
Vxarxa	Vmotor	-0,004	-72	0,3090

d)

Interval 0,11-0,15s	
Instants de valors màxims	
Vxarxa	0,1395
Ixarxa	0,1395
Vmotor	0,1445
Imotor	0,1445

Càlcul dels desfasaments				
Senyals		t_d	φ	cos(φ)
Vxarxa	Ixarxa	0,1	180	-1,0000
Vmotor	Imotor	0,1	180	-1,0000
Vxarxa	Vmotor	0,005	90	0,0000

Taules 6.2: Mesures dels punts característics i càlcul dels desfasaments dels assajos 3 i 4, en els intervals: a) I_{e3}, b) I_{ta3}, c) I_{e4} i d) I_{ta4}.

Els desfasaments entre la tensió i el corrent de xarxa són en tots els casos pròxims a zero, tal com es pretén amb l'ús de rectificador AFE, aconseguint així coeficients de potència pròxims ala unitat. A més, els coeficients dels intervals I_e, són positius, mentre que els dels intervals I_{ta} són negatius. Això és degut, a la inversió de fase del corrent en el transitori d'aturada, el qual permet el retorn d'energia a la xarxa.

Els desfasaments entre la tensió i el corrent del motor són majors, ja que el rang de potència en el que treballa es troba lluny de la potència nominal del motor, 4kW. El que si concorda amb els desfasaments de la xarxa és el sentit, és adir, en els intervals I_e els coeficients de potència són positius, mentre que en els intervals I_{ta} són negatius.

6.4.4. Comprovació dels senyals de velocitat i parell

La velocitat es manté constant durant tot el període de funcionament del motor. La velocitat de gir mesurada en els intervals I_e és molt pròxima a la velocitat de sincronisme corresponent; 1500 rpm.

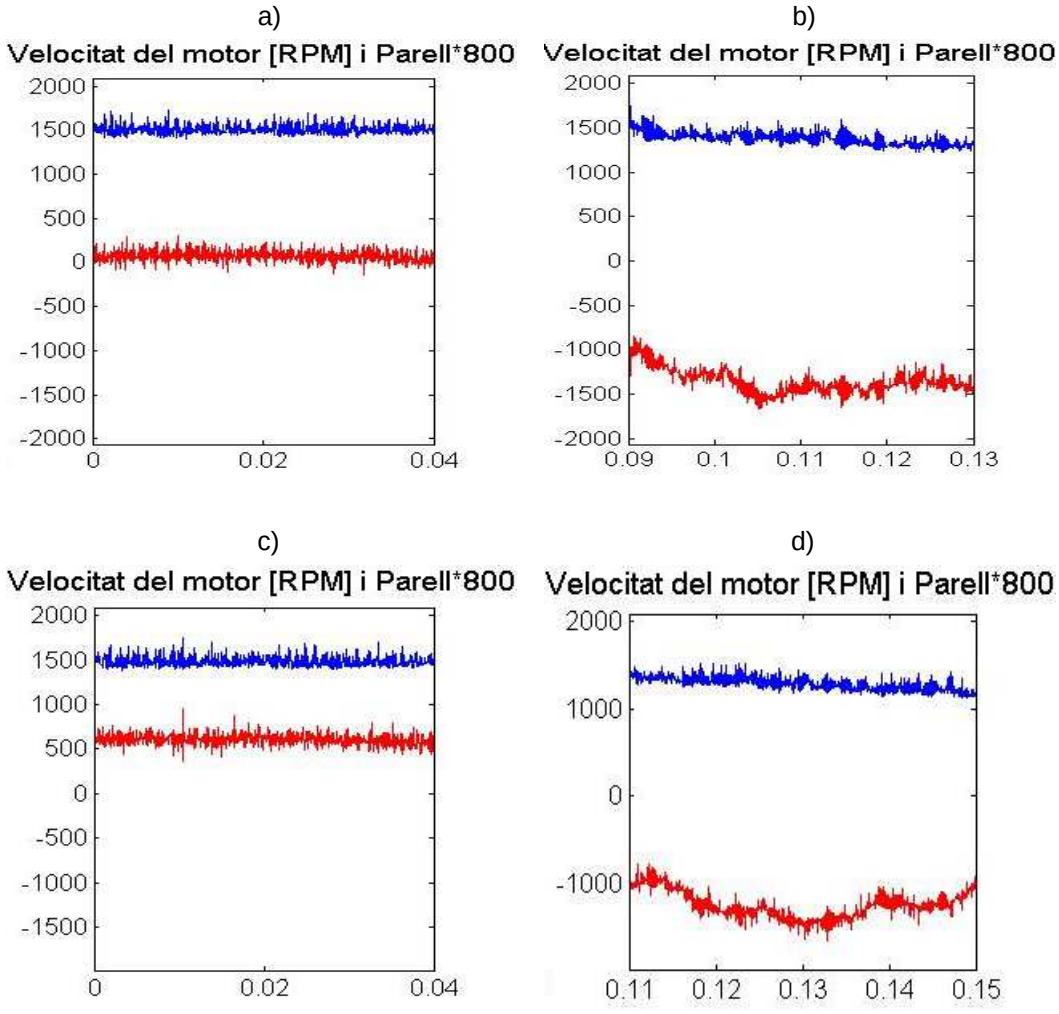


Figura 6.14: Senyals de velocitat de gir i parell dels assajos 3 i 4, en es intervals: a) I_{e3}, b) I_{ta3}, c) I_{e4} i d) I_{ta4}.

La velocitat de gir comença a decréixer en el moment en que s'apaga el motor, i en un temps aproximat de 0,3s passa de les 1500 rpm a estar parat. El temps

d'aturada utilitzant el rectificador AFE és inferior al temps que trigaria en aturar-se alimentant-lo amb una font trifàsica equilibrada de 230/400V, ja que l'energia cinètica és reconvertida en l'energia elèctrica que es retorna a la xarxa.

El parell també és un paràmetre interessant a analitzar, ja que el comportament entre els intervals I_e i I_{ta} varia. En els intervals I_e el parell mesurat depèn de l'esforç demandat en l'eix motor i per tant és diferent en els intervals I_{e3} i I_{e4}. En canvi, en els intervals I_{ta} el parell canvia de signe, el que vol dir un canvi de sentit de gir o el que és el mateix un parell de frenada, i a més l'amplitud del parell de frenada es manté constant i igual en els interval I_{ta3} i I_{ta4}.

6.4.5. Anàlisi de les potències calculades

La potència també és un paràmetre important en l'estudi del funcionament del conjunt i del rectificador AFE. L'avaluació de les potències determinarà les quantitats d'energia consumida i generada en el sistema estudiat, en aquest cas format bàsicament pel motor d'inducció.

En els assajos 3 i 4 caldrà distingir dues situacions, depenent de l'interval i el mode de funcionament d'aquest. En els intervals I_e el rectificador AFE està treballant com a rectificador AC/DC i per tant consumint potència de la xarxa. En els intervals I_{ta}, el rectificador està treballant com a inversor i per tant està retornant energia a la xarxa.

En els intervals I_{e3} i I_{e4} els consum de potència serà proporcional al parell desenvolupat en l'eix del motor. Així doncs, quan el motor treballa en buit, Assaig 3, les potències consumides de la xarxa, en el motor i entregada a l'eix són: P_c= 520W, P_{cmot}= 360W i P_{eix}= 330W. En l'Assaig 4, el motor treballa amb càrrega i les potències són: P_c= 2790W, P_{cmot}= 2590W i P_{eix}= 2450W.

Les potències en el transitori d'aturada, al que pertanyen els intervals I_{ta3} i I_{ta4}, van en sentit invers i per tant és potència que retorna a la xarxa. Aquest canvi és degut al canvi produït en els corrents del motor i de la xarxa, el qual ha passat d'anar en fase amb la tensió a anar en inversió de fase el que comporta que el factor de potència hagi passat de ser positiu i pròxim a la unitat a ser negatiu i també pròxim a -1.

Una diferència important en les potències és que, igual que passava amb el parell, les potències en l'interval I_e si que depenen de la càrrega, però les dels intervals I_{ta} no s'aprecia una gran diferència. Així doncs les potències en l'interval I_{ta3} són: P_c= -5580W, P_{cmot}= 5800W i P_{eix}= -5930W, i en l'interval I_{ta4} són les següents: P_c= -5260W, P_{cmot}= -5290W i P_{eix}= -5320W.

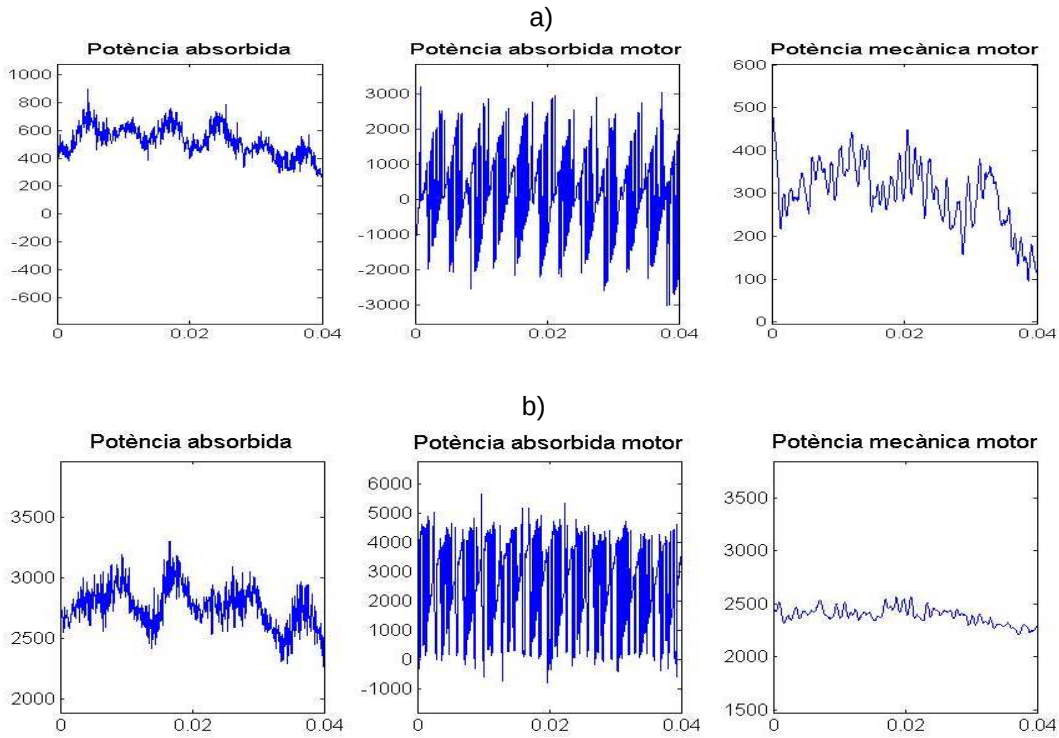


Figura 6.15: Senyals de potència absorbida de la xarxa, absorbida del motor i entregada en l'eix de motor dels assajos 3 i 4, en es intervals: a) I_{e3} i b) I_{e4}.

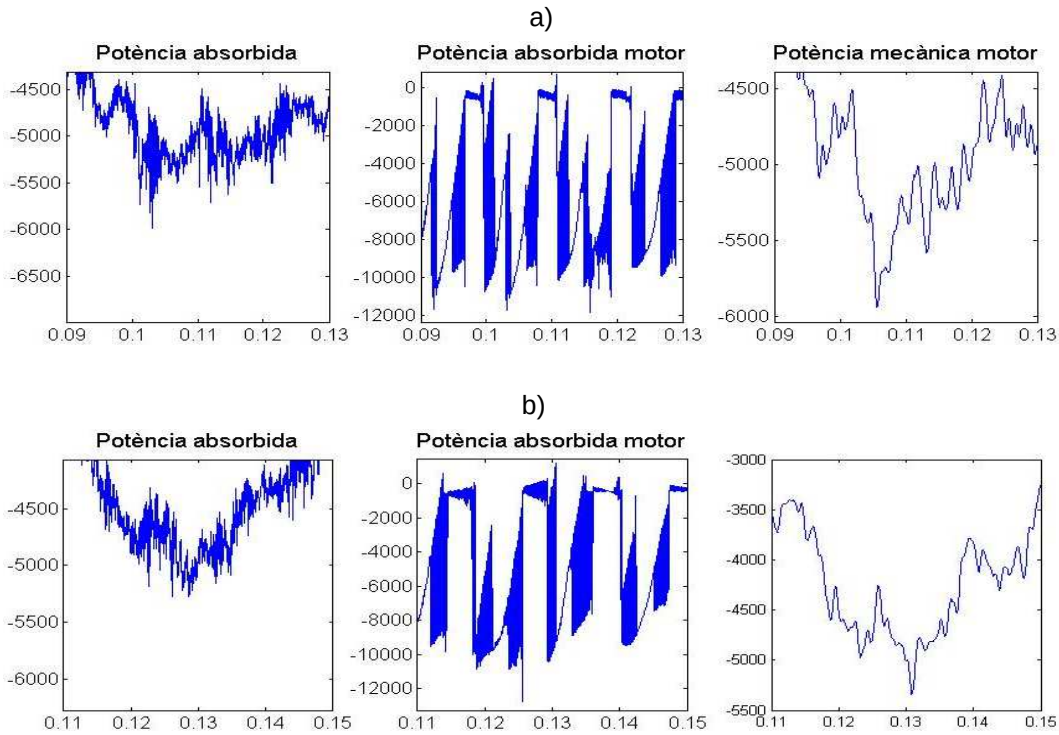


Figura 6.16: Senyals de potència absorbida de la xarxa, absorbida del motor i entregada en l'eix de motor dels assajos 3 i 4, en es intervals: a) I_{ta3} i b) I_{ta4}.

Analitzant les potències d'aquests intervals es pot veure que les potències en l'interval I_{ta}, quan el motor treballa en buit són superiors a les potències de quan treballa amb càrrega. Tot i això, també es pot observar com la diferència entre les potències en l'eix del motor és de 610W, mentre que la diferència en la potència entregada a la xarxa és redueix a 320W. Això vol dir, que el rendiment total quan treballa en buit també és menor al rendiment de quan treballa amb càrrega. A més el transitori d'aturada del motor treballant amb càrrega també és més llarg, que el transitori quan treballa en buit. El que repercutirà com es veurà més endavant amb la quantitat d'energia retornada a la xarxa en cada assaig.

La forma dels senyals de potència també cal diferenciar els intervals I_e i I_{ta}. En els intervals en que treballa com a rectificador els senyals de potència es mantenen constants. Les potències instantànies, potències representades gràficament, van oscil·lant, tot i això aquestes oscil·lacions són menors al 9%, per tant es poden considerar constants funcionant en un interval temporal superior a un cicle. En canvi en els intervals I_{ta} la potència de la xarxa i la potència de motor es comporten de formes diferents. La potència del motor es manté constant, mentre que la potència de la xarxa es va reduint de forma progressivament lineal, fins que s'atura el motor.

6.4.6. Càlcul i anàlisi dels rendiments

Per calcular els rendiments s'utilitzaran les potències consumides de la xarxa, al motor i la potència entregada a l'eix del motor. Així doncs, es calcularan els rendiments totals, de l'AFE i del motor en els diferents intervals. En les taules 6.3 i 6.4 s'han tabulat els rendiments dels assajos 3 i 4 respectivament.

Si es comparen els rendiments totals dels intervals I_{e3} i I_{e4}, es pot comprovar com l'increment, entre el rectificador AFE alimentant el motor en buit i quan el motor treballa amb càrrega, és del 24%.

En canvi, els rendiments totals dels intervals I_{ta} són pròxims a la unitat, el que es pot explicar amb l'augment de les potències, per tant una major estabilitat del sistema i uns valors de tensions, corrents i potències més propers als valors nominals.

La diferència entre els rendiments de l'AFE és del 19,7%, però del mateix ordre de magnitud que la diferència entre els rendiments totals. Per tant, es pot dir que la diferència en el rendiment total ve condicionada en gran part pel rendiment del rectificador AFE.

ASSAIG 3		
Conjunt/Element	**Interval**	**Rendiment**
Total	I_e	63,46 %
	I_{ta}	94,09 %
AFE	I_e	73,08 %
	I_{ta}	96,21 %
Motor	I_e	86,84 %
	I_{ta}	97,80 %

Taula 6.3: Rendiments totals, de l'AFE i el motor de l'Assaig 3.

ASSAIG 4		
Conjunt/Element	**Interval**	**Rendiment**
Total	I_e	87,50 %
	I_{ta}	98,80 %
AFE	I_e	92,80 %
	I_{ta}	99,40 %
Motor	I_e	94,60 %
	I_{ta}	99,40 %

Taula 6.4: Rendiments totals, de l'AFE i el motor de l'Assaig 4.

Finalment el rendiment del motor, que dependrà de la diferència entre la potència de treball i la potència nominal especificada en la placa de característiques. Així doncs, el rendiment treballant de l'interval I_{e3} serà inferior al rendiment del motor en l'interval I_{e4}. De la mateixa manera, els rendiments del motor en els intervals I_{ta} seran majors i pròxims a la unitat. Aquest increment és degut a l'apropament dels senyals de tensió, corrent i potències als valors nominals de treball del motor.

6.4.7. Anàlisi de l'energia recuperada

Per avaluar l'energia recuperada es tindran en compte les potències dels interval I_{ta} i la durada de l'interval d'aturada. D'aquesta manera es podran calcular, de forma gràfica, les quantitats d'energia retornades en cada un dels assajos.

L'energia elèctrica es calculà en unitats de potència per temps i es faran servir els watts per segon [Ws], ja que en el cas estudiat només s'ha considerat un motor amb una potència nominal de 4kW. Per calcular l'energia en el transitori d'aturada es considerarà la potència màxima en els intervals I_{ta} i que aquesta es va reduint de forma lineal fins a fer-se zero. A més, es considerarà que la duració d'aquest transitori (t_{ta}) és la mateixa, que el temps que triga el motor a aturar-se des de que s'apaga. Així doncs, es podrà calcular l'energia retornada en aquest interval utilitzant la següent formula:

$$Energia\ elect.retornada = \frac{P_{tamàx}}{2} \cdot t_{ta}$$

Així doncs, considerant que la duració dels transitoris d'aturada dels assajos 3 i 4 és de 0,3s i 0,4s respectivament, essent destacable que la duració d'aquest transitori és major quan treballa amb càrrega, i utilitzant les potències de les taules 4.4.2 i 4.4.8 es poden calcular les energies retornades treballant en buit (E_{e3}) i amb càrrega (E_{e4}):

$$E_{e3} = \frac{5580}{2} \cdot 0{,}3 = 837\ Ws$$

$$E_{e3} = \frac{5260}{2} \cdot 0{,}4 = 1052\ Ws$$

D'aquesta manera es pot comprovar, que tot i que la potència de pic de l'interval I_{ta3} és superior a la de I_{ta4}, l'energia total retornada en l'Assaig 4 és superior a l'energia retornada en l'Assaig 3.

6.5. Valoració del rectificador AFE en mode regeneratiu

En aquest apartat es farà la valoració del rectificador AFE, treballant en mode regeneratiu en l'aturada d'un motor d'inducció. La valoració es farà en dos àmbits d'especial importància com són l'econòmic i el ecològic.

La valoració del muntatge d'un rectificador AFE, però, no es farà únicament per un motor d'inducció, ja que degut a la baixa potència del motor i als baixos nivells d'energia obtinguts no tindria sentit. Per poder-ne valorar els avantatges del rectificador AFE es faran les següents hipòtesis:

- En el bus DC hi ha 10 motors d'idèntiques característiques al motor estudiat, treballant en les condicions de l'Assaig 4.
- Per qüestions alienes al sistema els motors han de parar cada 15 min.
- Els motors funcionen les 8h al dia, 5 dies a la setmana durant tot l'any.

A continuació es faran els càlculs corresponents per valorar, sobre la facturació elèctrica i les emissions de CO_2, la implantació d'un rectificador AFE.

6.5.1. Valoració econòmica de la utilització del rectificador AFE

La valoració econòmica es farà calculant els avantatges que comporta, la rectificació del factor de potència en la facturació elèctrica anual. A més, també es valorarà l'energia recuperada en les aturades, considerant l'estalvi econòmic que representaria el retorn d'aquesta energia ala xarxa. Pel càlcul s'utilitzaran les

tarifes aplicades actualment a espanya per la facturació del kWh (Taula 6.4) i les penalitzacions i bonificacions relacionades amb el factor de potència (Taula 6.5).

Franja horària	Punta	Pla	Vall
Preu kWh	0,12289 €	0,105733 €	0,076875

Taula 6.4: Preu €/kWh fixat per Endesa per empreses.

$\boldsymbol{fp \leq 0,98}$	PENALITZA 3% de la energia activa per 0,086998 €/kWh
$\boldsymbol{0,98 < fp < 0,995}$	Ni bonifica Ni penalitza
$\boldsymbol{fp \geq 0,995}$	BONIFICA 4% de l'energia activa per 0,086998 €/kWh

Taula 6.5: Valors del factor de potència per la bonificació i penalització, fixats per Endesa

Els desfasaments de l'Assaig 4 són els mateixos que es mostren en la taula 6.7

	Interval	**Angle (φ)**	**cos(φ)**
Xarxa	I_1: 0,00 - 0-04	0	1
	I_2: 0,11 - 0,15	180	-1
Motor	I_1: 0,00 - 0-04	54	0,59
	I_2: 0,11 - 0,15	180	-1

Taula 6.7: Angles i coeficients de potència entre la tensió i el corrent de l'Assaig 4.

Per fer la valoració econòmica no s'han tingut en compte els desfasaments de l'interval 2, ja que només es produeixen en l'instant d'apagada i la seva duració és inferior a un segon. Així doncs, per fer el càlcul dels costos s'haurà d'aplicar el percentatge de penalització, quan es consideri el funcionament sense l'AFE (fp < 0, 98), i el percentatge de bonificació, quan es consideri la connexió utilitzant l'AFE (fp > 0,995).

En primer lloc es calcularan els kWh consumits diàriament i mensualment, pels 10 motors, utilitzant les dades recollides en l'Assaig 4:

$$2800W \cdot 8h/dia \cdot 10 = 224 \text{ kWh/dia}$$

$$224\ kWh \cdot 20\ dies/mes = 4480 \text{ kWh/mes}$$

Ara es calcularà el cost mensual base, que servirà de referència:

$$4480\ kWh/mes \cdot 0{,}105733\ €/kWh = 473{,}68 \text{ €/mes}$$

A continuació es calcularan els costos de la penalització i la bonificació sobre l'energia activa consumida, els qual s'haurien d'aplicar segons els factors de potència de connexió a la xarxa:

$$\text{Penalització: } 0{,}03 \cdot 4480 \cdot 0{,}086998 = 11{,}693 \text{ €/mes}$$

$$\text{Bonificació: } 0{,}04 \cdot 4480 \cdot 0{,}086998 = 15{,}590 \text{ €/mes}$$

Per tenir una idea del que representen els costos de penalització i bonificació, sobre la facturació elèctrica mensual, es calcularan percentualment amb el cost base:

$$\text{Penalització: } 11{,}693 / 473{,}68 \cdot 100 = 2{,}5 \%$$

$$\text{Bonificació: } 15{,}590 / 473{,}68 \cdot 100 = 3{,}3 \%$$

Com es pot veure, els valors percentuals sobre el cost mensual són prou significatius, per tenir en compte la rectificació. A més, si en té en compte la diferència entre els dos casos (5,8 %), la diferència entre utilitzar o no utilitzar el rectificador AFE encara seria més important.

A continuació es farà el càlcul de l'energia retornada a la xarxa. En primer lloc es calcularà l'energia que es retornaria a la xarxa diària i mensualment:

$$0{,}2922 \cdot 10^{-3} \text{ kWh/parada} \cdot 4 \text{ parades/h} \cdot 8 \text{ h/dia} \cdot 10 = 0{,}0935 \text{ kWh/dia}$$

$$0{,}0935 \text{ kWh/dia} \cdot 20 = 1{,}87 \text{ kWh/mes}$$

Si es calcula l'estalvi d'aquest retorn d'energia s'obté:

$$1{,}87 \text{ kWh/mes} \cdot 0{,}105733 \text{ €/kWh} = 0{,}20 \text{€/mes}$$

Després de realitzar aquests càlculs es poden extreure algunes valoracions importants. En primer lloc, es pot afirmar, que la rectificació del factor de potència mitjançant el rectificador AFE és eficaç i serveix per minimitzar l'energia reactiva consumida i arribar al factor de potència de bonificació. D'aquesta manera es poden arribar a estalvis del 5,8% en la factura elèctrica, en instal·lacions de petites dimensions.

Per altra banda, s'ha vist que l'energia recuperada en els assajos realitzats és molt baixa. Així mateix, l'estalvi econòmic que suposa el retorn d'aquesta no és significatiu, en comparació amb els nivells d'energia elèctrica consumida. Tot i això, cal valorar la recuperació d'aquesta energia en motors de potències majors o treballant a un nivell de càrrega major. Perquè tal com s'ha vist en l'avaluació dels resultats l'energia retornada era major quan es treballava amb càrrega que en buit.

6.5.2. Valoració ecològica de la utilització de l'AFE

La utilització del rectificador AFE és sens dubte un avenç en el camp de la sostenibilitat. El control actiu de la rectificació i l'ús d'un bus comú per alimentar diferents equips, permet l'intercanvi d'energia entre equips o el retorn d'aquesta a la font principal. D'aquesta manera no es malbarataria l'energia sobrant o residual dels processos industrials i això permetria reduir les emissions de CO_2, ocasionades en la generació d'energia elèctrica a partir de processos de combustió.

A continuació es calcularà la reducció d'emissions de CO_2, que suposaria l'estalvi energètic calculat en l'apartat anterior (1,87kWh/mes) i l'equivalent en m^3 de gas natural.

Segons l'OCCC (Oficina Catalana del Canvi Climàtic) el mix de producció bruta d'energia elèctrica és de 300gCO_2/kWh. A partir d'aquesta dada es pot calcular la reducció d'emissions de CO_2 mensuals:

$$1{,}87\ \text{kWh} \cdot 300 = 561\ \text{g}CO_2/\text{mes}$$

L'equivalència en m^3 de gas natural, es calcularà a partir de les dades extretes de la GUIA PRÀCTICA PER AL CÀLCUL D'EMISSIONS DE GASOS AMB FECTE D'HIVERNACLE (GEH). Les dades extretes de la guia, referents al gas natural són que per cada m^3 de gas natural es generen 10,70kWh. Per tant l'estalvi de gas natural seria de :

$$\text{Estalvi de gas natural} = 1{,}87/10{,}70 = 0{,}1748\ m^3$$

Tot i que la reducció d'emissions de CO_2 calculada no és elevada, cal considerar l'escala de l'estudi elaborat. A més, l'equivalència d'emissions en m^3 de gas natural demostra que tot i ser un valor petit, aquest representa un estalvi en la generació d'aquesta energia, que d'una altra manera s'hauria perdut.

Després d'avaluar la recuperació energètica, caldria fer una valoració, per veure si realment en una empresa d'aquestes dimensions la inversió de recursos materials, humans i monetaris es veuen compensats. El que si es pot garantir és un estalvi d'energia, que creixerà si s'hi connecten aparells amb un alt grau d'energia perduda: motor d'altes potències que paren sovint, motors que funcionen com a fre o amb grans inèrcies.

7. Conclusions

Un cop finalitzat aquest projecte es pot afirmar que s'ha complert amb èxit l'objectiu plantejat. La prova és que s'han obtingut paràmetres analítics, que proporcionen informació de com funciona el rectificador AFE. En l'estudi experimental del rectificador AFE s'ha pogut observar la rectificació del factor de potència, el control actiu de la tensió en el bus de continua, la recuperació d'energia i el retorn d'aquesta a la xarxa. A més, s'han vist experimentalment els avantatges de la utilització del rectificador AFE davant els sots de tensió.

En primer lloc comentar els avantatges tècnics que comporta la utilització del sistema AFE. La utilització d'aquest sistema, al utilitzar un bus de continua per a la distribució de potència, permet simplificar el cablejat de les instal·lacions industrials i facilitar la connexió de diferents aparells. A més, també simplifica la compatibilitat entre xarxes, ja que cada aparell utilitza un inversor per a la connexió amb el bus i aquest està connectat a la font principal a través del rectificador actiu. D'aquesta manera s'evita haver de fer la distribució de 230Vac, 400Vac, tensions cc (24V, 12V, etc.), a més d'haver de compensar l'energia de cada línia per separat i amb una font diferent.

En els assajos en que s'ha sotmès el rectificador AFE a un sot de tensió, s'ha comprovat com aquest atenua els afectes del sot en el motor. Davant de sots de tensió del 50% de la tensió nominal, s'ha comprovat com la tensió en el motor conserva el seu valor eficaç. D'aquesta manera la velocitat no es veu afectada i es redueix la sobreintensitat, produïda en la font principal, en un 70%. Protegint així els components que formen el motor.

També s'ha comprovat la correcció del factor de potència. En l'avaluació dels resultats s'ha pogut veure com s'aconseguien factors de potència, en la font principal, pròxims a la unitat. Tot i treballar en factors de potència pròxims a 0,6 en la banda del motor, el factor de potència al costat de la font principal s'arribava a factors de potència bonificables (>0,995).

En l'aturada del motor s'ha verificat experimentalment la inversió del corrent i el retorn d'energia a la xarxa. En aquests assajos s'ha comprovat com la ràpida gestió del rectificador AFE en la gestió dels interruptors IGBTs, permet optimitzar l'aturada del motor retornant l'energia de frenada a la xarxa. A més, en aquests casos també s'ha comprovat com aquesta energia tenia un al percentatge d'energia activa i es minimitzava la generació d'energia reactiva.

En la valoració dels resultats obtinguts s'ha vist com efectivament és una molt bona opció per a rectificació, però els resultats obtinguts en la recuperació d'energia no són destacables. Tot i això, aquesta energia s'hauria perdut, per tant cal considerar la utilització d'aquest equips a nivell ecològic, tant pel que fa la recuperació d'energia pels alts rendiments elèctrics obtinguts en la rectificació.

Finalment comentar, que seria interessant l'assaig del rectificador AFE amb motors de potències majors, així com la connexió de múltiples equips, amb capacitat regeneradora, al bus de continua. D'aquesta manera es podria fer una millor avaluació de la implantació d'un sistema front end en la industria, ja que aquest estudi a petita escala, tot i demostrar-ne el correcte funcionament no es equiparable al funcionament industrial d'un rectificador AFE.

Bibliografia

Stephen J. Chapman. *Máquinas Eléctricas*. Mc Graw Hill. 3ª ed.

Muhammad H. Rashid. Power Electronics Handbook. BH, 3a ed.

Melendez Joaquim, Mora Juan Jose. *Caracterización de huecos de tensión para la localización de fallas en sistemas de distribución*. Scientia et Technica. 2004.

García Quintero Edwin, Fuster Roig Vicente. *Metodología para la evaluación de huecos de tensión*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antiquia. 2010.

Narasimha Reddy B. *Vector Control and Monitoring of Grid Connected Active Front End Converter*. Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Science Bangore. 2011.

Suh Yongsug, Tijeras Valentin i A.Lipo Thomas. *A Control Method in dq Synchronous Frame for PWM Boost Rectifier under Generalitzed* Unbalanced Operating Conditions. University of Wisconnsin. 2002.

Wang Xiaoyu.L, U. Jinjin, Hu Jinka, Meng Yuji i Yuan Chang. *Frequency Characteristics of the Synchronous-Frame Based D-Q Methods for Active* Power Filters. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University.

Sylvain Lechat Sanjuan. Voltage Oriented *Control of Three-Phase Boost PWM* Converters. Chalmers University of Technology. 2010.

Marco Liseno, Steffan Hansen. *Design and Control of an LCL-Filter-Based* Three-Phase Active Rectifier.

J. Rodriguez, J. Dixon, J. Espinoza i P. Lezana. *PWM Regenerative Rectifiers* State of Art.

OCCC (Oficina Catalana del Canvi Climàtic). *Guia pràctica per al càlcul* d'emissions de gasos amb efecte hivernacle (GEH). 2013.

Induction Motor Braking Regenerative Plugging Dynamic Braking of Induction Motor. www.electrical4u.com (accedit 1471172013)

ABB – Motores y Generadores. www.abb.es

VACON – Productos. www.vacon.com/productos