

José Lorente Vall

Càlcul dels efectes dels desequilibris de tensió en un motor de inducció trifàsic

TREBALL DE FI DE GRAU

Dirigit pel Luís Guasch Pesquer

Grau d'Enginyeria Elèctrica



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2014



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI

Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

Càlcul dels efectes dels desequilibris de tensió en un motor d'inducció trifàsic

1. Índex general

TITULACIÓ: Grau d'Enginyeria Elèctrica

AUTOR: Jose Lorente Vall

DIRECTOR: Luis Guasch Pesquer

DATA: Juny / 2014

Índex general

2	Memòria	6
2.1	Objecte	6
2.2	Abast	6
2.3	Antecedents.....	6
2.4	Desequilibris de tensió.....	7
2.4.1	Sistema de tensió equilibrat.....	7
2.4.2	Causes d'un sistema de tensions desequilibrat.....	7
2.4.3	Components simètriques	8
2.4.4	Definicions de diferents índex de desequilibris	9
2.4.5	Límit d'un sistema equilibrat	11
2.4.6	Classificació dels desequilibris de tensions	11
2.5	Motor d'inducció trifàsic	14
2.5.1	Paràmetres funcionals	14
2.5.2	Model matemàtic.....	15
2.6	Resultats finals.....	17
2.6.1	Velocitat mecànica del motor.....	17
2.6.2	Selecció dels punts de desequilibris de tensió analitzats.....	18
2.6.3	Presentació del desequilibri de corrent (CUF)	41
2.6.4	Presentació del desequilibri del parell (TUF)	56
2.6.5	Presentació del valor mig de la tensió.....	71
2.6.6	Anàlisi dels resultats.....	75
2.6.7	Conclusions	80
2.6.8	Programa de càlcul	80
2.6.9	Pla de gestió de la qualitat durant la redacció del treball	81
2.7	Definicions i abreviatures	81
2.8	Normes i referències	82
3	Annex	86
3.1	Càlculs	86
3.1.1	Càlcul de la tensió de fase i de línia del motor.....	86
3.1.2	Càlcul del valor mig de tensió.....	89
3.1.3	Càlcul del desequilibri de tensió (VUF).....	90
3.1.4	Càlcul del desequilibri de corrent (CUF)	95
3.1.5	Càlcul del desequilibri del parell (TUF)	96



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI

Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

Càlcul dels efectes dels desequilibris de tensió en un motor d'inducció trifàsic

2. Memòria

TITULACIÓ: Grau d'Enginyeria Elèctrica

AUTOR: Jose Lorente Vall

DIRECTOR: Luis Guasch Pesquer

DATA: Juny / 2014

Índex memòria

2	Memòria	6
2.1	Objecte	6
2.2	Abast	6
2.3	Antecedents.....	6
2.4	Desequilibris de tensió.....	7
2.4.1	Sistema de tensió equilibrat.....	7
2.4.2	Causes d'un sistema de tensions desequilibrat.....	7
2.4.3	Components simètriques	8
2.4.4	Definicions de diferents índex de desequilibris	9
2.4.5	Límit d'un sistema equilibrat	11
2.4.6	Classificació dels desequilibris de tensions	11
2.5	Motor d'inducció trifàsic	14
2.5.1	Paràmetres funcionals	14
2.5.2	Model matemàtic.....	15
2.6	Resultats finals	17
2.6.1	Velocitat mecànica del motor.....	17
2.6.2	Selecció dels punts de desequilibris de tensió analitzats.....	18
2.6.3	Presentació del desequilibri de corrent (CUF)	41
2.6.4	Presentació del desequilibri del parell (TUF)	56
2.6.5	Presentació del valor mig de la tensió.....	71
2.6.6	Anàlisi dels resultats.....	75
2.6.7	Conclusions	80
2.6.8	Programa de càlcul	80
2.6.9	Pla de gestió de la qualitat durant la redacció del treball	81
2.7	Definicions i abreviatures	81
2.8	Normes i referències	82

2 Memòria

2.1 Objecte

Aquest treball té com a objectiu calcular l'efecte en el corrent i el parell que provoquen els desequilibris de tensió en un motor d'inducció trifàsic.

Per realitzar aquests càlculs s'utilitzarà el model matemàtic en règim permanent del motor d'inducció trifàsic, sotmès a un total 870 punts de desequilibri, de diferents tipologies i severitat.

Finalment, s'analitzen els resultats obtinguts.

2.2 Abast

L'àmbit d'aplicació del projecte és el següent:

- Classificació i quantificació dels desequilibris de tensió en règim permanent per un sistema de tensions trifàsic.
- Criteris i selecció dels punts de desequilibri analitzats.
- Quantificació dels efectes dels desequilibris en el corrent i el parell d'un motor d'inducció trifàsic.
- Càlcul dels índex de desequilibri en el corrent i el parell d'un motor d'inducció trifàsic, pels punts de desequilibri analitzats.
- Anàlisi dels resultats obtinguts i conclusions.

2.3 Antecedents

El motor a utilitzar en el treball és un motor asíncron o d'inducció, amb rotor en gàbia d'esquirol, ja que és dels motors elèctrics més utilitzats en la indústria. La seva gran utilització en la indústria es deguda a un manteniment econòmic, que té poques averies gracies a la seva robustesa, funcionament més segur i de construcció més senzilla.

Idealment, aquests motors han de treballar sempre en condicions nominals, i han de ser alimentats per un sistema de tensions trifàsiques equilibrades. Però no sempre són alimentats per un sistema de tensions equilibrat. Si les tensions de línia aplicades al motor no són iguals (en mòdul i/o argument), donen com ha resultat un desequilibri en els corrents i el parell, el que comporta canvis en: rendiment, factor de potència, temperatura, aparició de vibracions, etc.

Aquest Treball Fi de Grau, a diferència de la referència [11], obté els resultats a partir de càlculs directes, agafant com a referència el model matemàtic del motor en règim permanent. S'ha utilitzat aquest mètode donat que aquest tipus de pertorbacions a les xarxes elèctriques són de caràcter permanent, i no transitòries com podrien ser els sots de tensió. Si bé aquest camí no permet determinar l'evolució temporal dels corrents i el parell, ha permès obtenir resultats qualitativament molt similars fent ús únicament d'un full de càlcul i els coneixements adquirits en les assignatures vinculades a les Màquines Elèctriques. A la referència [11] es va utilitzar el programa PSIM per obtenir els resultats. Aquest programa utilitza un model matemàtic del motor d'inducció trifàsic en règim dinàmic, i requereix un temps de càlcul per punt de desequilibri que impedeix fer un anàlisi de l'efecte de molts punts de desequilibri.

2.4 Desequilibris de tensió

2.4.1 Sistema de tensió equilibrat

En un sistema de tensions trifàsic equilibrat les tres ones han de complir les condicions següents:

- Mateixa forma d'ona.
- Mateixa freqüència.
- Mateixa amplitud.
- Desfasament de 120° entre elles.

L'evolució temporal i la representació fasorial es mostra a la figura 2.1.

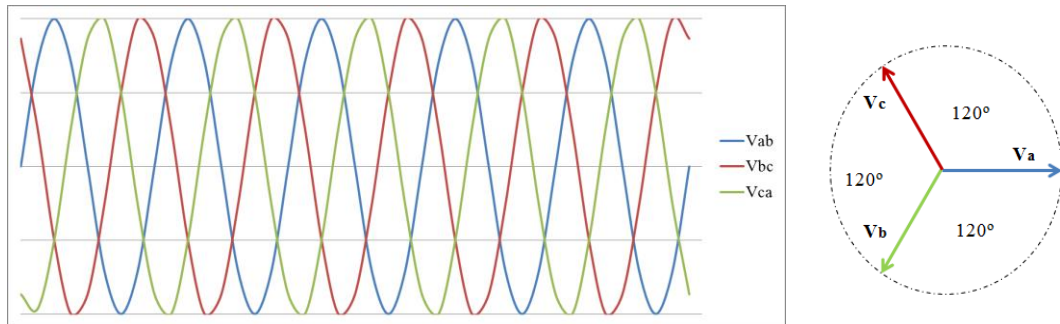


Figura 2.1. Evolució temporal de les tensions i diagrama fasorial d'un sistema de tensions trifàsic equilibrat.

El sistema serà desequilibrat si no compleix qualsevol de les 4 condicions esmentades anteriorment.

2.4.2 Causes d'un sistema de tensions desequilibrat

El desequilibri de tensió pot venir causat per diferents causes. La principal causa es per una distribució desigual de les càrregues monofàsiques entre les diferents fases. També són possibles altres causes com la asimetria de les impedàncies dels enrotllaments dels transformadors, la presència de bancs de transformadors en estrella y en triangle en buit, impedàncies de transmissió asimètriques degudes a una incompleta transposició, i la fusió accidental de fusibles en bancs de condensadors, tal com s'esmenta a la referència [4].

Un sistema de tensions desequilibrat pot provocar efectes perjudicials sobre les càrregues i sobre el mateix sistema de potència. La figura 2.2 mostra l'evolució temporal i el diagrama fasorial d'un sistema de tensions desequilibrat.

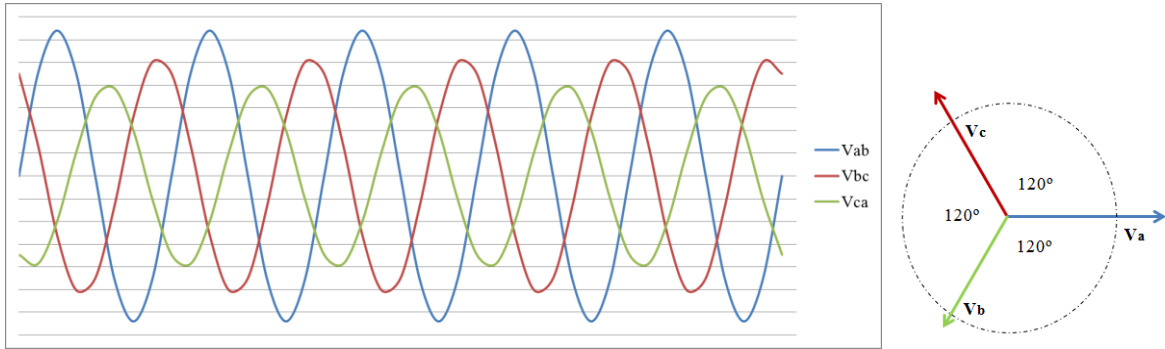


Figura 2.2. Evolució temporal de les tensions i diagrama fasorial d'un sistema de tensions trifàsic desequilibrat.

2.4.3 Components simètriques

Per analitzar un sistema trifàsic de tensions desequilibrat es pot utilitzar el teorema de Fortescue o Stokvis. Aquest teorema demostra que un sistema trifàsic de tensions desequilibrat es pot analitzar sumant els efectes que produeixen tres sistemes de tensions equilibrats de: seqüència directa, seqüència inversa i seqüència homopolar:

1. *Component directa o de seqüència positiva:* consisteixen en tres fasors de igual magnitud desfasats un de l'altre 120° i que tenen la mateixa seqüència de fase que les fases originals. Els tres fasors estan designats com $V_{a,1}$, $V_{b,1}$ i $V_{c,1}$.
2. *Component inversa o de seqüència negativa:* consisteix en tres fasors iguals en magnitud, desplaçats en fase un de l'altre en 120° . La seva seqüència de fase es contraria a las fases originals. Els tres fasors estan designats com $V_{a,2}$, $V_{b,2}$ i $V_{c,2}$.
3. *Component homopolar o de seqüència zero:* consisteix en tres fasors iguals en magnitud i amb un desplaçament de fase zero un del altre. Els tres fasors estan designats com $V_{a,0}$, $V_{b,0}$ i $V_{c,0}$.

La figura 2.3 mostra gràficament com s'obté a partir d'un sistema trifàsic de tensions desequilibrades, tres sistemes trifàsics de tensions equilibrats.

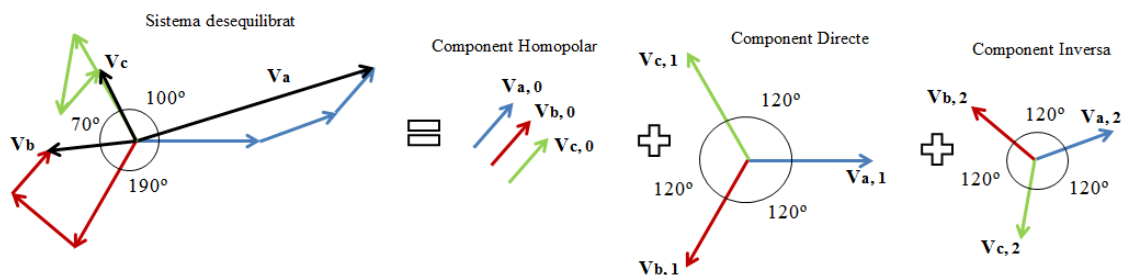


Figura 2.3. Representació gràfica de la descomposició d'un sistema de tensions trifàsiques desequilibrat en les components simètriques: homopolar, directa i inversa.

A continuació es mostren les equacions per com calcular aquestes components. Les expressions següents es realitzen per a la tensió, però també es podria aplicar sobre el corrent.

$$\bar{V}_0 = \frac{1}{3}(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) \quad (2.1)$$

$$\bar{V}_1 = \frac{1}{3}(V_{ab} + aV_{bc} + a^2V_{ca}) \quad (2.2)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{3}(V_{ab} + a^2V_{bc} + aV_{ca}) \quad (2.3)$$

El primer sistema d'equacions mostra les components simètriques (V_0 , V_1 i V_2) en funció de les tensions de línia (V_{ab} , V_{bc} i V_{ca}). Aquest sistema d'equacions utilitza un operador a , que es defineix com:

$$a = e^{120^\circ} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \quad (2.4)$$

També es pot obtenir el valor de a^2 , que es defineix com:

$$a^2 = e^{-120^\circ} = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \quad (2.5)$$

Un cop analitzats els 3 sistemes trifàsics equilibrats, es pot obtenir el resultat del sistema desequilibrat a partir de les equacions següents:

$$V_{ab} = V_0 + V_1 + V_2 \quad (2.6)$$

$$V_{bc} = V_0 + a^2V_1 + aV_2 \quad (2.7)$$

$$V_{ca} = V_0 + aV_1 + a^2V_2 \quad (2.8)$$

2.4.4 Definicions de diferents índex de desequilibris

2.4.4.1 Definicions de l'índex de desequilibri de tensions

La norma EN UNE 50160 defineix com desequilibri de tensió en un sistema trifàsic, la condició en la qual els valors eficaços de les tensions de fase o els angles entre fases consecutives no són iguals.

Per quantificar el desequilibri existeixen diferents criteris, alguns d'associacions i altres d'investigadors:

1. *Definició NEMA*: La norma NEMA “*National Equipment Manufacturer's Association*” defineix els desequilibris de tensions mitjançant un índex que es coneix com “*Line Voltage Unbalance Rate*” (LVUR). Aquest índex és la divisió entre la màxima desviació de tensió de línia respecte el valor de línia mig i el voltatge de línia mig.

$$LVUR = \frac{\text{Màxima desviació } (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})}{\frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}} \quad (2.9)$$

2. *Definició IEEE*: La definició de la IEEE “*Institute of Electrical and Electronic Engineers*”, coneguda com “*Phase voltage unbalance rate*” (PVUR) utilitza el mateix concepte que la norma NEMA però en compte d'utilitzar la tensió de línia, utilitza la tensió fase – neutre.

$$PVUR = \frac{\text{Màxima desviació } (V_{an}, V_{bn}, V_{cn})}{\frac{V_{an} + V_{bn} + V_{cn}}{3}} \quad (2.10)$$

3. *Definició IEC o definició de les components simètriques*: La definició de la IEC es coneguda com “*Voltage unbalance factor*” (VUF), i la formula per calcular el desequilibri de tensió és la següent:

$$VUF = \frac{|\bar{V}_2|}{|\bar{V}_1|} \cdot 100 \quad (2.11)$$

On V_1 i V_2 són les tensions de seqüència directa i inversa respectivament. Les seves equacions són respectivament la 2.7 i 2.8.

4. *Índex Oliveira – Wang*: Aquest índex es coneix amb el nom “*Complex voltage unbalance factor*” (CVUF). Aquest índex és el mateix que el donat per la IEC, la única diferència és que aquest índex inclou el fasor de les components directa i inversa.

$$CVUF = \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \cdot 100 \quad (2.12)$$

En el treball s'utilitzaran les definicions de la IEC i l'índex Oliveira – Wang, de fet la primera és una particularització de la segona.

2.4.4.2 Definició de l'índex de desequilibri de corrent

Anàlogament a la *Definició IEC* La definició de la IEC sobre el desequilibri de tensions coneguda “*Voltage unbalance factor*” també es coneix el factor de desequilibri de corrent “*Current unbalance factor*” (CUF), i la formula per calcular el desequilibri de corrent és la següent:

$$CUF = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100 \quad (2.13)$$

On I_1 i I_2 són el mòdul de la component del corrent de seqüència directa i inversa respectivament.

2.4.4.3 Definició de l'índex de desequilibri del parell

Anàlogament a la *Definició IEC* La definició de la IEC sobre el desequilibri de tensions coneguda “*Voltage unbalance factor*” també es coneix el factor de desequilibri del parell “*Torque unbalance factor*” (TUF), i la formula per calcular el desequilibri de parell és la següent:

$$TUF = \frac{T_2}{T_1} \cdot 100 \quad (2.14)$$

On T_1 i T_2 són la component del parell de seqüència directa i inversa respectivament.

2.4.5 Límit d'un sistema equilibrat

En l'article 102 del RD 1955/2000 per el que es regulen les activitats de transport, distribució, comercialització, subministrament i procediments de autorització de instal·lacions d'energia elèctrica es fa referència a la qualitat del producte. Segons l'esmentat real decret, per determinar els aspectes de la qualitat del producte es seguiran uns criteris establerts en la norma UNE-EN 50.160.

Aquesta norma UNE-EN 50160 sobre les característiques de la tensió subministrada per les xarxes generals de distribució, per baixa, mitja i alta tensió, i en condicions normals d'explotació, durant cada període de una setmana, el 95% dels valors eficaços (cada valor eficaç és el valor mig cada 10 min), han de presentar un factor de desequilibri entre el 0% i el 2%.

També s'estableix que en algunes regions, els desequilibris poden arribar al 3% en els punts de subministrament trifàsics.

Aquest límit del 2% de desequilibri és el més utilitzat per la majoria de les normes i referències de caràcter internacional, i serà l'escollit també en aquest treball.

2.4.6 Classificació dels desequilibris de tensions

En aquest treball s'avaluaran els diferents tipus de desequilibris utilitzant la classificació sobre desequilibris que va publicar l'autor Ching-Yin Lee en un article publicat en 1999 anomenat "*Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-phase Induction Motor*". En aquest article es classifiquen els desequilibris en vuit tipus, que formen tres grans grups: desequilibri per caiguda de tensió, desequilibri per sobretensió i desequilibri per variació de l'angle.

Els tipus de desequilibris definits per Lee són:

1. T1 (1Φ-UV): una fase en desequilibri per caiguda de tensió.
2. T2 (2Φ-UV): dos fases en desequilibri per caiguda de tensió.
3. T3 (3Φ-UV): tres fases en desequilibri per caiguda de tensió.
4. T4 (1Φ-OV): una fase en desequilibri per sobretensió.
5. T5 (2Φ-OV): dos fases en desequilibri per sobretensió.
6. T6 (3Φ-OV): tres fases en desequilibri per sobretensió.
7. T7 (1Φ-A): desequilibri per variació d'angle en una fase
8. T8 (2Φ-A): desequilibri per variació d'angle en dos fases.

A continuació es mostren l'evolució temporal de les tensions i el diagrama fasorial per cada tipus de desequilibri de tensió.

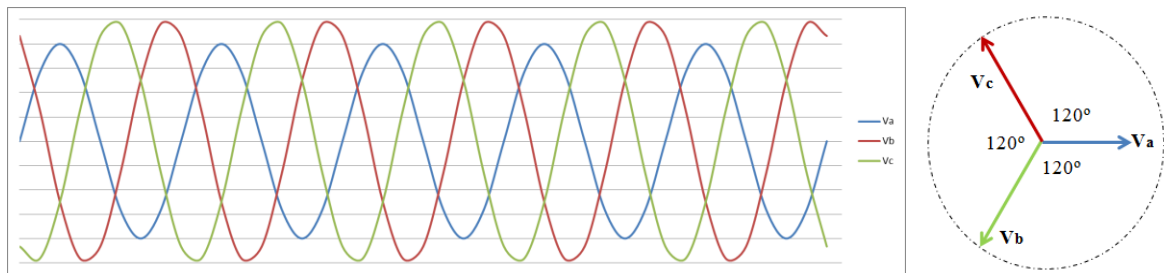


Figura 2.4. Evolució temporal de les tensions i diagrama fasorial per un desequilibri tipus T1.

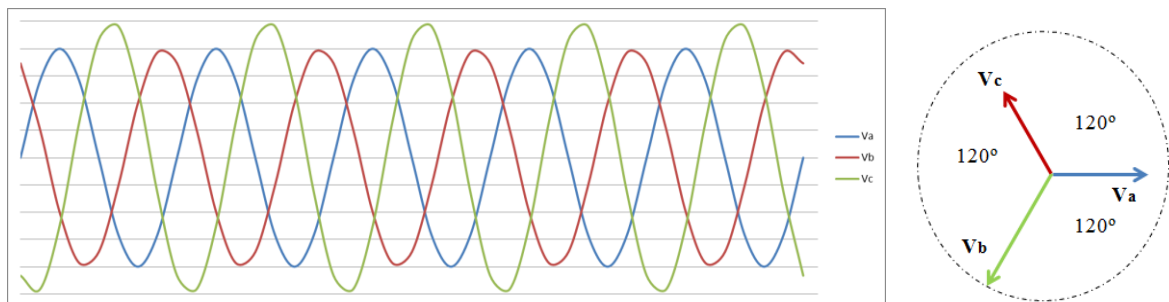


Figura 2.5. Evolució temporal de les tensions i diagrama fasorial per un desequilibri tipus T2

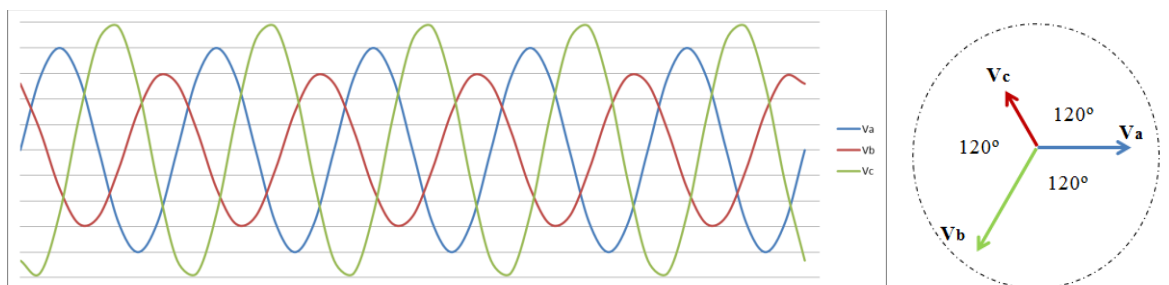


Figura 2.6. Evolució temporal de les tensions i diagrama fasorial per un desequilibri tipus T3

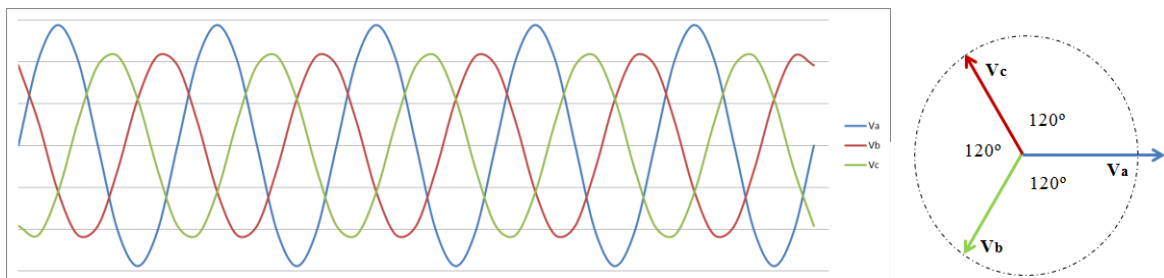


Figura 2.7. Evolució temporal de les tensions i diagrama fasorial per un desequilibri tipus T4

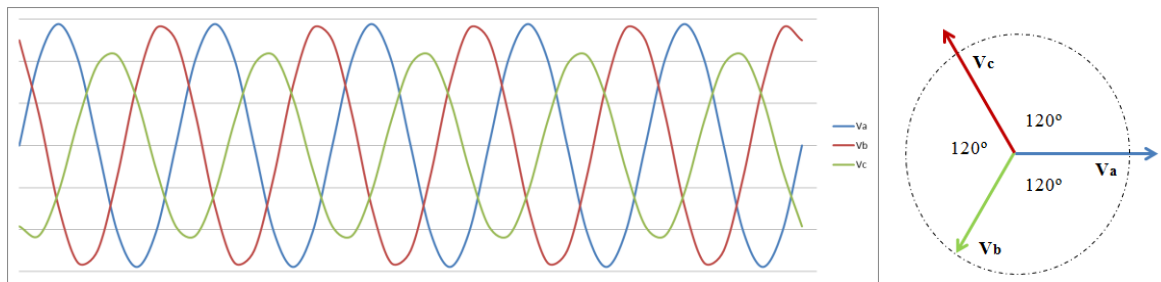


Figura 2.8. Evolució temporal de les tensions i diagrama fasorial per un desequilibri tipus T5

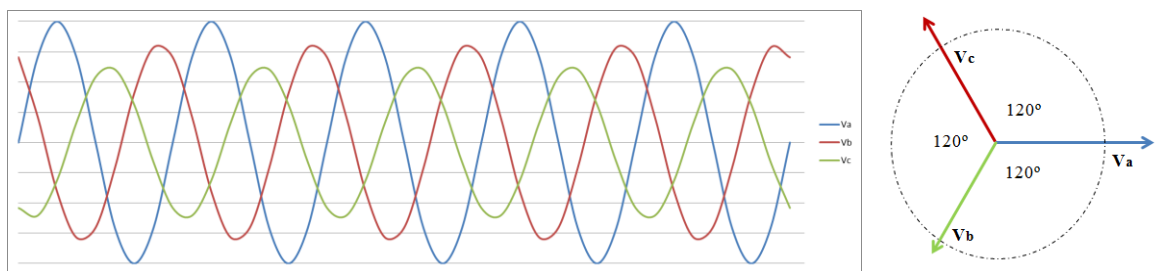


Figura 2.9. Evolució temporal de les tensions i diagrama fasorial per un desequilibri tipus T6

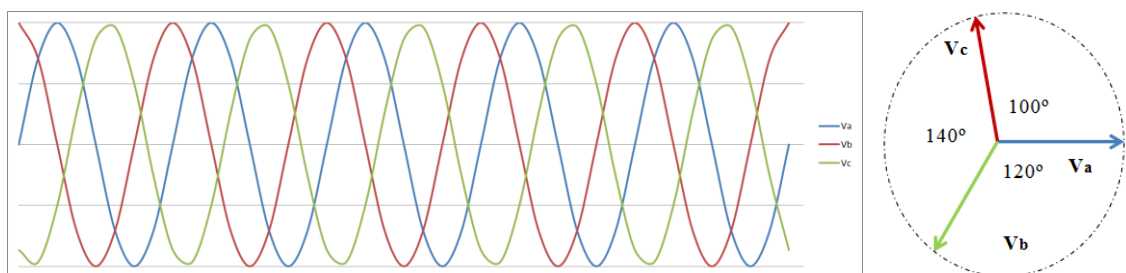


Figura 2.10. Evolució temporal de les tensions i diagrama fasorial per un desequilibri tipus T7

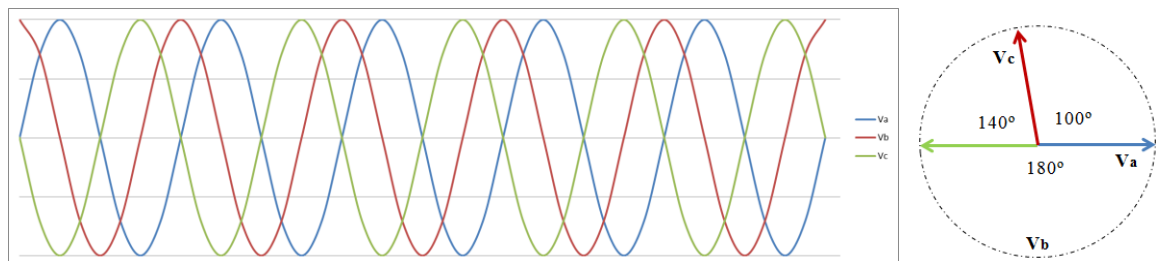


Figura 2.11. Evolució temporal de les tensions i diagrama fasorial per un desequilibri tipus T8

2.5 Motor d'inducció trifàsic

El motor escollit per realitzar el treball ha estat un motor d'inducció trifàsic amb el rotor de gàbia d'esquirol. Les seves característiques es poden veure en la taula 2.1

Característiques del motor d'inducció en gàbia d'esquirol	
Potència	75 kW
Tensió	3300 V
frequència	50 Hz
Intensitat	15.32 A
Velocitat	1455 min ⁻¹
Parell	492.2 Nm

Taula 2.1. Característiques del motor d'inducció en gàbia d'esquirol.

Cal dir, que el motor té una càrrega mecànica amb el parell amb relació lineal amb la velocitat, i el parell de la càrrega a velocitat nominal és el parell nominal. La connexió del debanat de l'estator del motor és en estrella, i els paràmetres del seu model equivalent s'observen en la taula 2.2.

Paràmetres del model equivalent del motor d'inducció en gàbia d'esquirol	
Rs	4.734 Ω
Ls	38.4 mH
Rr	3.447 Ω
Lr	38.4 mH
Lm	1.6643 H

Taula 2.2. Paràmetres del model equivalent del motor d'inducció en gàbia d'esquirol.

2.5.1 Paràmetres funcionals

2.5.1.1 Velocitat de sincronisme

La velocitat de sincronisme és la velocitat del camp magnètic creada al introduir pels debanats de l'estator unes corrents de una xarxa trifàsica de freqüència f_1 . El seu valor està expressat en min⁻¹, i la seva equació és la següent:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (2.15)$$

Cal afegir que en el cas de les components simètriques la component inversa gira en sentit contrari a la component directa com es mostra en la equació següent:

$$n_{1d} = n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (2.16)$$

$$n_{1i} = -n_{1d} \quad (2.17)$$

2.5.1.2 Lliscament

Es coneix com a lliscament, com el quocient de la diferencia de la velocitat de sincronisme de la màquina i la velocitat del motor, entre la velocitat de sincronisme de la màquina. El motor girarà a una velocitat inferior a la de sincronisme, es a dir la seva velocitat de règim és asíncrona. L'equació del lliscament és la següent:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2.18)$$

Pel cas de les components simètriques el lliscament per la component directa i inversa quedaria de la següent manera:

$$s_d = \frac{n_{1d} - n}{n_{1d}} \quad (2.19)$$

$$s_i = \frac{n_{1i} - n}{n_{1i}} = 2 - s_d \quad (2.20)$$

2.5.2 Model matemàtic

El circuit equivalent d'un motor d'inducció té com objectiu obtenir un circuit que expliqui el funcionament de la màquina elèctrica. Si la màquina elèctrica és simètrica i té un sistema de tensions equilibrat el sistema trifàsic es podrà separar en tres sistemes monofàsics independents. En tot circuit equivalent els valors seran per fase i el sistema serà en regim permanent sinusoidal. Aquests models matemàtics no representen les pèrdues mecàniques.

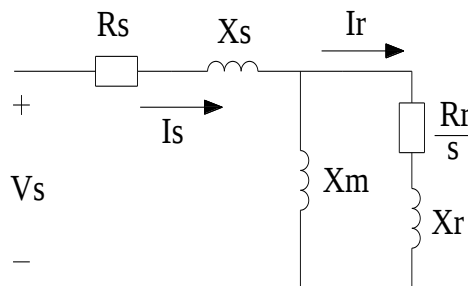


Figura 2.12. Circuit equivalent per fase d'un motor d'inducció en gàbia d'esquirol

A partir del circuit equivalent anterior calculem un equivalent de Thevenin. Les equacions de la tensió i impedància del circuit equivalent de Thevenin són les següents:

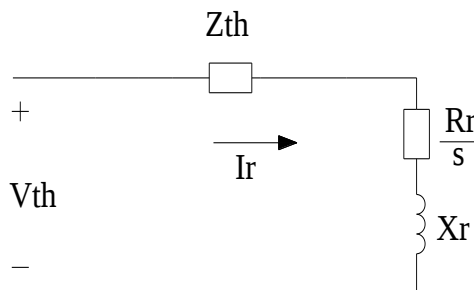


Figura 2.13. Circuit equivalent de Thevenin per fase d'un motor d'inducció en gàbia d'esquirol

$$\overline{V}_{th} = \frac{X_m j}{R_s + (X_s + X_m)j} \cdot \overline{V}_s \quad (2.21)$$

$$\overline{Z}_{th} = \frac{(R_s + X_s j) \cdot X_m j}{R_s + (X_s + X_m)j} \quad (2.22)$$

$$I_r = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_r)^2}} \quad (2.23)$$

L'equació anterior mostra la corrent del rotor per fase en un motor d'inducció. On V_{th} es la tensió de Thevenin, R_{th} és la part real de la impedància de Thevenin i X_{th} es la part imaginària de la impedància de Thevenin.

L'equació 2.24 mostra el parell del motor per fase. On ω_s és la velocitat de sincronisme del motor (en rad/s) i s correspon al lliscament. Finalment, la formula 2.25 mostra el parell motor en funció dels paràmetres del circuit equivalent de Thevenin.

$$T = \frac{3 \cdot R_r}{\omega_s \cdot s} \cdot \overline{I}_r^2 \quad (2.24)$$

$$T = \frac{3 \cdot R_r}{\omega_1 \cdot s} \cdot \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_r)^2} \quad (2.25)$$

Per calcular la corrent de l'estator a partir del circuit equivalent per fase d'un motor d'inducció en gàbia d'esquirol es realitza el paral·lel de les impedàncies que hi ha a la rama del rotor i en la rama magnetitzant. Llavors el circuit equivalent resultant surt en funció de la corrent de l'estator. La corrent de l'estator i el paral·lel de les impedàncies es pot obtenir respectivament amb les equacions 2.25 i 2.26.

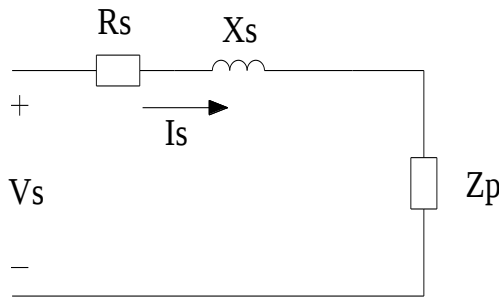


Figura 2.14. Circuit per fase d'un motor d'inducció en gàbia d'esquirol pel càlcul del corrent de l'estator

$$\overline{I}_s = \frac{\overline{V}_s}{R_s + X_s j + \overline{Z}_p} \quad (2.26)$$

$$\overline{Z}_p = \frac{X_m j + \left(\frac{R_r}{s} + X_r j\right)}{\frac{R_r}{s} + (X_m + X_r)j} \quad (2.27)$$

2.6 Resultats finals

2.6.1 Velocitat mecànica del motor

Per poder realitzar càlculs posteriors s'ha hagut de realitzar una hipòtesi. Aquesta hipòtesi ha consistit en suposar que la velocitat del motor és constant tota l'estona, i de valor igual al nominal del motor:

$$n_N = 1455 \text{ min}^{-1} \quad (2.28)$$

S'ha escollit aquesta hipòtesi perquè en altres treballs en els que s'ha utilitzat el model de règim dinàmic s'ha comprovat que la velocitat del motor presenta molt poques variacions i, de fet, en aquests treballs no s'acaba estudiant l'efecte dels desequilibris en la velocitat del motor.

Per calcular els lliscaments corresponents a les seqüències directa i inversa, cal saber les velocitats de sincronisme de cada una d'aquestes components. En primer lloc, es calcula la velocitat de sincronisme del motor per un sistema equilibrat:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (2.29)$$

La component directa presenta la mateixa velocitat de sincronisme i la component inversa gira en sentit contrari a la component directa.

$$n_{1d} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (2.30)$$

$$n_{1i} = -1500 \text{ min}^{-1} \quad (2.31)$$

Conseqüentment les velocitats angulars, en rad/s, són:

$$\omega_{1d} = 50\pi \text{ rad/s} \quad (2.32)$$

$$\omega_{1i} = -50\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (2.33)$$

Els lliscaments de les components directa i indirecta són:

$$s_d = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0,03 \quad (2.34)$$

$$s_i = \frac{-1500 - 1455}{-1500} = 1,97 \quad (2.35)$$

En aquest apartat es mostren els mètodes utilitzats per quantificar el desequilibri segons la classificació esmentada en l'apartat 2.4.6. Es realitzen els càlculs dels diferents desequilibris de tensió en el motor d'inducció trifàsic (característiques esmentades en l'apartat 2.5.2) sobre algunes de les seves variables com la intensitat i el parell.

Els càlculs s'han realitzat utilitzant el teorema de de Fortescue i també utilitzant el circuit equivalent per fase d'un motor d'inducció de gàbia d'esquirol per a les tensions de seqüència directa i indirecta.

2.6.2 Selecció dels punts de desequilibris de tensió analitzats

En aquest treball es realitzarà el càlcul de l'efecte de 870 punts de desequilibri en el corrent i el parell d'un motor d'inducció trifàsic.

Els criteris seleccionats per escollir aquests punts han estat:

- Cobrir les 8 tipologies de desequilibris.
- Cobrir diferents graus de severitat de desequilibris, amb valors per sota, al límit ($VUF = 2\%$), i per sobre de la norma: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5%. És pràcticament impossible trobar valors de desequilibri a les línies reals per sobre del 5%.

Per cada una de les 8 tipologies de desequilibris definides s'ha emprat un criteri que permeti determinar els punts de desequilibri a analitzar. A l'apartat següent es defineixen aquests criteris.

2.6.2.1 Punts de desequilibri per T1

Una fase en desequilibri per caiguda de tensió (1Φ-UV): Per aquest tipus de desequilibri s'agafa una caiguda de tensió en la fase V_{an} tan gran com requereixi el VUF a analitzar, i en les altres fases no hi ha caiguda de tensió. S'ha repetit el mateix procediment mantenint constants V_{bn} i V_{cn} . Representant mitjançant valors en pu:

$$V \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.36)$$

$$1 \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.37)$$

$$1 \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ \quad V \angle 120^\circ \quad (2.38)$$

En les taules 2.3, 2.4 i 2.5 es mostren els resultats obtinguts per alguns dels VUF's determinats per a cada fase en desequilibri per caiguda de tensió (1Φ-UV). Els resultats obtinguts en les taules són els valors de la tensió de fase i el valor de VUF.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T1(0,5%) FASE A	1	1877	1905	1905	0,5%
T1(2%) FASE A	1	1793	1905	1905	2,0%
T1(3,5%) FASE A	1	1712	1905	1905	3,5%
T1(5%) FASE A	1	1633	1905	1905	5,0%

Taula 2.3. Desequilibri tipus T1 amb caiguda de tensió a la fase a

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T1(0,5%) FASE B	1	1905	1877	1905	0,5%
T1(2%) FASE B	1	1905	1793	1905	2,0%
T1(3,5%) FASE B	1	1905	1712	1905	3,5%
T1(5%) FASE B	1	1905	1633	1905	5,0%

Taula 2.4. Desequilibri tipus T1 amb caiguda de tensió a la fase b

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T1(0,5%) FASE C	1	1905	1905	1877	0,5%
T1(2%) FASE C	1	1905	1905	1793	2,0%
T1(3,5%) FASE C	1	1905	1905	1712	3,5%
T1(5%) FASE C	1	1905	1905	1633	5,0%

Taula 2.5. Desequilibri tipus T1 amb caiguda de tensió a la fase c**2.6.2.2 Punts de desequilibri per T2**

Dos fases en desequilibri per caiguda de tensió (2Φ-UV): Per aquest tipus de desequilibri es determina que una fase, primerament en la V_{an} no hi ha caiguda de tensió, i en les altres dos fases, V_{bn} i V_{cn} hi ha la mateixa caiguda de tensió. Les tensions V_{bn} i V_{cn} s'aniran modificant fins obtenir el VUF desitjat. També s'han realitzat els desequilibris tant per la fase b com per la fase c. Representant mitjançant valors en pu:

$$1 \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad V \angle 120^\circ \quad (2.39)$$

$$V \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ \quad V \angle 120^\circ \quad (2.40)$$

$$V \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.41)$$

Un altre tipus de desequilibri a aplicar es agafant la fase V_{an} com fase sense caiguda de tensió, la fase V_{bn} com tensió a modificar a voluntat fins obtenir el VUF desitjat, i la fase V_{cn} com la suma de V_{an} i V_{bn} entre dos. També s'han realitzat els desequilibris tant per la fase b com per la fase c. Representant mitjançant valors en pu:

$$1 \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad \frac{1+V}{2} \angle 120^\circ \quad (2.42)$$

$$V \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ \quad \frac{V+1}{2} \angle 120^\circ \quad (2.43)$$

$$\frac{V+1}{2} \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.44)$$

En les taules 2.6 i 2.7 es mostren els resultats obtinguts per alguns VUF, determinats per la fase a per un desequilibri tipus T2. En la taula 2.6 en la fase a no hi ha caiguda de tensió, i en les altres dos fases hi ha la mateixa caiguda de tensió. En la taula 2.7 en la fase a no hi ha caiguda de tensió, i les altres dues tenen caiguda de tensió. La fase c és la suma de les fases a i b entre dos, i la fase b és la fase a modificar la tensió fins obtenir el

desequilibri desitjat. Els resultats obtinguts en les taules són els valors de la tensió de fase i el valor de VUF.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T2(0,5%) Va=VaN	2	1905	1877	1877	0,5%
T2(2%) Va=VaN	2	1905	1795	1795	2,0%
T2(3,5%) Va=VaN	2	1905	1718	1718	3,5%
T2(5%) Va=VaN	2	1905	1645	1645	5,0%

Taula 2.6. Desequilibri tipus T2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.39).

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T2(0,5%) Va=VaN	2	1905	1873	1889	0,5%
T2(2%) Va=VaN	2	1905	1778	1841	2,0%
T2(3,5%) Va=VaN	2	1905	1687	1796	3,5%
T2(5%) Va=VaN	2	1905	1602	1753	5,0%

Taula 2.7. Desequilibri tipus T2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.42).

2.6.2.3 Punts de desequilibri per T3

Tres fases en desequilibri per caiguda de tensió (3Φ-UV): Per aquest tipus de desequilibri es determina la fase V_{an} com una caiguda de tensió del 2 %, la fase V_{bn} com la tensió a modificar a voluntat fins obtenir el VUF desitjat, i la fase V_{cn} com la suma de V_{an} i V_{bn} entre dos. Per trobar altres punts de desequilibri es va augmentant la caiguda de tensió de la fase V_{an} en intervals del 2% fins arribar a una caiguda de tensió màxima del 20 %. Representant mitjançant valors en pu:

$$0,98 \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad \frac{0,98 + V}{2} \angle 120^\circ \quad (2.45)$$

$$0,8 \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad \frac{0,8 + V}{2} \angle 120^\circ \quad (2.46)$$

També s'han realitzat els desequilibris tant per la fase b com per la fase c. En aquestes fases se li aplica la una caiguda de tensió progressiva del 2%, primer a una i després a l'altre, una de les fases restant es la suma de dues de elles entre dos, i l'altre es modifica a voluntat fins obtenir el VUF desitjat. Representant mitjançant valors en pu:

$$V \angle 0^\circ \quad 0,98 \angle -120^\circ \quad \frac{V + 0,98}{2} \angle 120^\circ \quad (2.47)$$

$$V_{an} = \frac{V + 0,98}{2} \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad 0,98 \angle 120^\circ \quad (2.48)$$

$$V \angle 0^\circ \quad 0,8 \angle -120^\circ \quad V_{cn} = \frac{V + 0,8}{2} \angle 120^\circ \quad (2.49)$$

$$\frac{V + 0,8}{2} \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad 0,8 \angle 120^\circ \quad (2.50)$$

A continuació es mostren alguns dels resultats obtinguts per a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T3(0,5%) 0,98VaN	3	1867	1835	1851	0,5%
T3(2%) 0,98VaN	3	1867	1742	1805	2,0%
T3(3,5%) 0,98VaN	3	1867	1654	1760	3,5%
T3(5%) 0,98VaN	3	1867	1570	1718	5,0%

Taula 2.8. Desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 2% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T3(0,5%) 0,96VaN	3	1829	1798	1813	0,5%
T3(2%) 0,96VaN	3	1829	1707	1768	2,0%
T3(3,5%) 0,96VaN	3	1829	1620	1725	3,5%
T3(5%) 0,96VaN	3	1829	1537	1683	5,0%

Taula 2.9. Desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 4% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T3(0,5%) 0,94VaN	3	1791	1760	1776	0,5%
T3(2%) 0,94VaN	3	1791	1671	1731	2,0%
T3(3,5%) 0,94VaN	3	1791	1586	1689	3,5%
T3(5%) 0,94VaN	3	1791	1505	1648	5,0%

Taula 2.10. Desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 6% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T3(0,5%) 0,92VaN	3	1753	1723	1738	0,5%
T3(2%) 0,92VaN	3	1753	1635	1694	2,0%
T3(3,5%) 0,92VaN	3	1753	1552	1653	3,5%
T3(5%) 0,92VaN	3	1753	1473	1613	5,0%

Taula 2.11. Desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 8% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T3(0,5%) 0,90VaN	3	1715	1685	1700	0,5%
T3(2%) 0,90VaN	3	1715	1600	1657	2,0%
T3(3,5%) 0,90VaN	3	1715	1519	1617	3,5%
T3(5%) 0,90VaN	3	1715	1441	1578	5,0%

Taula 2.12. Desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 10% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T3(0,5%) 0,88VaN	3	1677	1648	1662	0,5%
T3(2%) 0,88VaN	3	1677	1564	1620	2,0%
T3(3,5%) 0,88VaN	3	1677	1485	1581	3,5%
T3(5%) 0,88VaN	3	1677	1409	1543	5,0%

Taula 2.13. Desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 12% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T3(0,5%) 0,86VaN	3	1639	1610	1624	0,5%
T3(2%) 0,86VaN	3	1639	1529	1584	2,0%
T3(3,5%) 0,86VaN	3	1639	1451	1545	3,5%
T3(5%) 0,86VaN	3	1639	1377	1508	5,0%

Taula 2.14. Desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 14% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T3(0,5%) 0,84VaN	3	1600	1573	1587	0,5%
T3(2%) 0,84VaN	3	1600	1493	1547	2,0%
T3(3,5%) 0,84VaN	3	1600	1417	1509	3,5%
T3(5%) 0,84VaN	3	1600	1345	1473	5,0%

Taula 2.15. Desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 16% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T3(0,5%) 0,82VaN	3	1562	1535	1549	0,5%
T3(2%) 0,82VaN	3	1562	1458	1510	2,0%
T3(3,5%) 0,82VaN	3	1562	1384	1473	3,5%
T3(5%) 0,82VaN	3	1562	1313	1438	5,0%

Taula 2.16. Desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 18% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T3(0,5%) 0,80VaN	3	1524	1498	1511	0,5%
T3(2%) 0,80VaN	3	1524	1422	1473	2,0%
T3(3,5%) 0,80VaN	3	1524	1350	1437	3,5%
T3(5%) 0,80VaN	3	1524	1281	1403	5,0%

Taula 2.17. Desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 20% a la fase a.

2.6.2.4 Punts de desequilibri per T4

Una fase en desequilibri per sobretensió (1Φ -OV): Per aquest tipus de desequilibri s'agafa una sobretensió en la fase V_{an} tan gran com requereixi el VUF a analitzar, i en les altres fases no hi ha sobretensió. S'ha repetit el mateix procediment mantenint constants V_{bn} i V_{cn} . Representant mitjançant valors en pu:

$$V \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.51)$$

$$1 \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.52)$$

$$1 \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ \quad V \angle 120^\circ \quad (2.53)$$

En les taules 2.18, 2.19 i 2.20 es mostren els resultats obtinguts per alguns dels VUF's determinats per a cada fase en desequilibri tipus T4. Els resultats obtinguts en les taules són els valors de la tensió de fase i el valor de VUF.

	Tipus	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	VUF(%)
T4(0,5%) FASE A	4	1934	1905	1905	0,5%
T4(2%) FASE A	4	2022	1905	1905	2,0%
T4(3,5%) FASE A	4	2113	1905	1905	3,5%
T4(5%) FASE A	4	2206	1905	1905	5,0%

Taula 2.18. Desequilibri tipus T4, amb caiguda de tensió a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T4(0,5%) FASE B	4	1905	1934	1905	0,5%
T4(2%) FASE B	4	1905	2022	1905	2,0%
T4(3,5%) FASE B	4	1905	2113	1905	3,5%
T4(5%) FASE B	4	1905	2206	1905	5,0%

Taula 2.19. Desequilibri tipus T4, amb caiguda de tensió a la fase b.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T4(0,5%) FASE C	4	1905	1905	1934	0,5%
T4(2%) FASE C	4	1905	1905	2022	2,0%
T4(3,5%) FASE C	4	1905	1905	2113	3,5%
T4(5%) FASE C	4	1905	1905	2206	5,0%

Taula 2.20. Desequilibri tipus T4, amb caiguda de tensió a la fase c.

2.6.2.5 Punts de desequilibri per T5

Dos fases en desequilibri per sobretensió (2Φ-OV): Per aquest tipus de desequilibri es determina que una fase, primerament en la V_{an} no hi ha sobretensió, i en les altres dos fases, V_{bn} i V_{cn} hi ha la mateixa sobretensió. Les tensions V_{bn} i V_{cn} s'aniran modificant fins obtenir el VUF desitjat. També s'han realitzat els desequilibris tant per la fase b com per la fase c. Representant mitjançant valors en pu:

$$1 \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad V \angle 120^\circ \quad (2.54)$$

$$V \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ \quad V \angle 120^\circ \quad (2.55)$$

$$V \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.56)$$

Un altre tipus de desequilibri a aplicar es agafant la fase V_{an} com fase sense sobretensió, la fase V_{bn} com tensió a modificar a voluntat fins obtenir el VUF desitjat, i la fase V_{cn} com la suma de V_{an} i V_{bn} entre dos. També s'han realitzat els desequilibris tant per la fase b com per la fase c. Representant mitjançant valors en pu:

$$1 \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad V_{cn} = \frac{1+V}{2} \angle 120^\circ \quad (2.57)$$

$$V \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ \quad V_{cn} = \frac{1+V}{2} \angle 120^\circ \quad (2.58)$$

$$V_{an} = \frac{V+1}{2} \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.59)$$

En les taules 2.21 i 2.22 es mostren els resultats obtinguts per alguns VUF, determinats per a la fase a per un desequilibri tipus T5. En la taula 2.21 en la fase a no hi ha sobretensió, i en les altres dos fases hi ha la mateixa sobretensió. En la taula 2.22 en la fase a no hi ha sobretensió, i les altres dues tenen sobretensió. La fase c és la suma de les fases a i b entre dos, i la fase b és la fase a modificar la tensió fins obtenir el desequilibri desitjat. Els resultats obtinguts en les taules són els valors de la tensió de fase i el valor de VUF.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T5(0,5%) Va=VaN	5	1905	1934	1934	0,5%
T5(2%) Va=VaN	5	1905	2024	2024	2,0%
T5(3,5%) Va=VaN	5	1905	2120	2120	3,5%
T5(5%) Va=VaN	5	1905	2223	2223	5,0%

Taula 2.21. Desequilibri tipus 2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.54).

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T5(0,5%) Va=VaN	5	1905	1939	1922	0,5%
T5(2%) Va=VaN	5	1905	2042	1974	2,0%
T5(3,5%) Va=VaN	5	1905	2151	2028	3,5%
T5(5%) Va=VaN	5	1905	2267	2086	5,0%

Taula 2.22. Desequilibri tipus 2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.57).

2.6.2.6 Punts de desequilibri per T6

Tres fases en desequilibri per sobretensió (3Φ-OV): Per aquest tipus de desequilibri es determina la fase V_{an} amb una sobretensió del 2 %, la fase V_{bn} com la tensió a modificar a voluntat fins obtenir el VUF desitjat, i la fase V_{cn} com la suma de V_{an} i V_{bn} entre dos. Per trobar altres punts de desequilibri es va augmentant la sobretensió de la fase V_{an} en intervals del 2% fins arribar a una sobretensió del 20 %. Representant mitjançant valors en pu:

$$1,02 \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad \frac{1,02 + V}{2} \angle 120^\circ \quad (2.60)$$

$$1,2 \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad \frac{1,2 + V}{2} \angle 120^\circ \quad (2.61)$$

També s'han realitzat els desequilibris tant per la fase b com per la fase c, en les quals en aquestes fases se li aplica la sobretensió progressiva del 2%, primer a una i després a l'altre, una de les fases restant es la suma de dues de elles entre dos, i l'altre es modifica a voluntat fins obtenir el VUF desitjat. Representant mitjançant valors en pu:

$$V \angle 0^\circ \quad 1,02 \angle -120^\circ \quad \frac{V + 1,02}{2} \angle 120^\circ \quad (2.62)$$

$$\frac{V + 1,02}{2} \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad 1,02 \angle 120^\circ \quad (2.63)$$

$$V \angle 0^\circ \quad 1,2 \angle -120^\circ \quad V_{cn} = \frac{V + 1,2}{2} \angle 120^\circ \quad (2.64)$$

$$\frac{V + 1,2}{2} \angle 0^\circ \quad V \angle -120^\circ \quad 1,2 \angle 120^\circ \quad (2.65)$$

A continuació es mostren alguns dels resultats obtinguts per a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T6(0,5%) 1,02VaN	6	1943	1977	1960	0,5%
T6(2%) 1,02VaN	6	1943	2083	2013	2,0%
T6(3,5%) 1,02VaN	6	1943	2194	2069	3,5%
T6(5%) 1,02VaN	6	1943	2312	2128	5,0%

Taula 2.23. Desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 2% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T6(0,5%) 1,04VaN	6	1981	2016	1999	0,5%
T6(2%) 1,04VaN	6	1981	2124	2053	2,0%
T6(3,5%) 1,04VaN	6	1981	2237	2109	3,5%
T6(5%) 1,04VaN	6	1981	2357	2169	5,0%

Taula 2.24. Desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 4% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T6(0,5%) 1,06VaN	6	2020	2055	2037	0,5%
T6(2%) 1,06VaN	6	2020	2165	2092	2,0%
T6(3,5%) 1,06VaN	6	2020	2280	2150	3,5%
T6(5%) 1,06VaN	6	2020	2403	2211	5,0%

Taula 2.25. Desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 6% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T6(0,5%) 1,08VaN	6	2058	2094	2076	0,5%
T6(2%) 1,08VaN	6	2058	2205	2132	2,0%
T6(3,5%) 1,08VaN	6	2058	2323	2190	3,5%
T6(5%) 1,08VaN	6	2058	2448	2253	5,0%

Taula 2.26. Desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 8% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T6(0,5%) 1,10VaN	6	2096	2132	2114	0,5%
T6(2%) 1,10VaN	6	2096	2246	2171	2,0%
T6(3,5%) 1,10VaN	6	2096	2366	2231	3,5%
T6(5%) 1,10VaN	6	2096	2493	2294	5,0%

Taula 2.27. Desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 10% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T6(0,5%) 1,12VaN	6	2134	2171	2153	0,5%
T6(2%) 1,12VaN	6	2134	2287	2210	2,0%
T6(3,5%) 1,12VaN	6	2134	2409	2272	3,5%
T6(5%) 1,12VaN	6	2134	2539	2336	5,0%

Taula 2.28. Desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 12% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T6(0,5%) 1,14VaN	6	2172	2210	2191	0,5%
T6(2%) 1,14VaN	6	2172	2328	2250	2,0%
T6(3,5%) 1,14VaN	6	2172	2452	2312	3,5%
T6(5%) 1,14VaN	6	2172	2584	2378	5,0%

Taula 2.29. Desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 14% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T6(0,5%) 1,16VaN	6	2210	2249	2229	0,5%
T6(2%) 1,16VaN	6	2210	2369	2289	2,0%
T6(3,5%) 1,16VaN	6	2210	2495	2353	3,5%
T6(5%) 1,16VaN	6	2210	2629	2420	5,0%

Taula 2.30. Desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 16% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T6(0,5%) 1,18VaN	6	2248	2287	2268	0,5%
T6(2%) 1,18VaN	6	2248	2410	2329	2,0%
T6(3,5%) 1,18VaN	6	2248	2538	2393	3,5%
T6(5%) 1,18VaN	6	2248	2675	2461	5,0%

Taula 2.31. Desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 18% a la fase a.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn	VUF(%)
T6(0,5%) 1,20VaN	6	2286	2326	2306	0,5%
T6(2%) 1,20VaN	6	2286	2450	2368	2,0%
T6(3,5%) 1,20VaN	6	2286	2581	2434	3,5%
T6(5%) 1,20VaN	6	2286	2720	2503	5,0%

Taula 2.32. Desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 20% a la fase a.

2.6.2.7 Punts de desequilibri per T7

Desequilibri per variació de l'angle en una fase (1Φ-A): Per aquest tipus de desequilibri s'agafa una variació de l'angle en la fase V_{an} tan gran com requereixi el VUF a analitzar, i en les altres fases no hi ha desequilibri per variació d'angle. Els angles originals són 0° per la fase a, -120° per la fase b i 120° per la fase c. El que es fa en aquest tipus de desequilibri es anar augmentant l'angle de la fase que varia fins arribar al valor desitjat de VUF. També s'ha realitzat variant l'angle de les fases V_{bn} , i V_{cn} . Representant mitjançant valors en pu:

$$1 \angle \alpha \quad 1 \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.58)$$

$$1 \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ + \alpha \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.59)$$

$$1 \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ + \alpha \quad (2.60)$$

La taula 2.33 mostra els valors dels angles de les tensions de fase en graus i el VUF per un desequilibri tipus T7 per a la fase a. El valor de tensió en totes les fases es igual a 1905,25 V ja que és un desequilibri tipus T7, on les tensions no es veuen afectades pel desequilibri sinó sols l'angle de una de les fases.

	Tipus	$\angle V_{an}$	$\angle V_{bn}$	$\angle V_{cn}$	VUF(%)
T7(0,5%) FASE A	7	0,02	-120,00	120,00	0,5%
T7(2%) FASE A	7	0,06	-120,00	120,00	2,0%
T7(3,5%) FASE A	7	0,10	-120,00	120,00	3,5%
T7(5%) FASE A	7	0,15	-120,00	120,00	5,0%

Taula 2.33. Desequilibri tipus T7 per a la fase a

2.6.2.8 Punts de desequilibri per T8

Desequilibri per variació d'angle en dos fases (2Φ-A): Per aquest tipus de desequilibri es determina que una fase, primerament en la V_{an} no hi ha desequilibri per variació d'angle i l'angle que li correspon és l'original de 0° , i en les altres dos fases, V_{bn} i V_{cn} hi ha el mateix desequilibri per variació d'angle. Es a dir que l'angle original de les fases b i c que és -120° i 120° respectivament es modifica fins obtenir el desequilibri de tensió desitjat. També s'han realitzat els desequilibris tant per la fase b com per la fase c. Representant mitjançant valors en pu:

$$1 \angle 0^\circ \quad 1 \angle -120^\circ + \alpha \quad 1 \angle 120^\circ - \alpha \quad (2.61)$$

$$1 \angle \alpha \quad 1 \angle -120^\circ \quad 1 \angle 120^\circ - \alpha \quad (2.62)$$

$$1 \angle \alpha \quad 1 \angle -120^\circ + \alpha \quad 1 \angle 120^\circ \quad (2.63)$$

Un altre tipus de desequilibri a aplicar és agafant la fase V_{an} com fase sense desequilibri per variació d'angle, la fase V_{bn} com la tensió a modificar a voluntat fins obtenir el VUF desitjat, i la fase V_{cn} com la suma dels angles de V_{an} i V_{bn} entre dos. També s'han realitzat els desequilibris tant per la fase b com per la fase c, en les que aquestes fases per cada desequilibri diferent no tenen desequilibri per variació d'angle en la seva fase, i una de les altres fases es la suma del angles de dues de elles entre dos, i en l'altre fase es modifica l'angle a voluntat fins obtenir el VUF desitjat. Representant mitjançant valors en pu:

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_{an} \angle 0^\circ & V_{bn} &= V_{bnN} \angle -120^\circ + \alpha \\ V_{cn} &= V_{cnN} \angle 120^\circ + \left(\frac{0 + (120 + (-120^\circ + \alpha))}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_{anN} \angle \alpha & V_{bn} &= V_{bn} \angle -120^\circ \\ V_{cn} &= V_{cnN} \angle 120^\circ + \left(\frac{0 + (120 + (-120^\circ + \alpha))}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.65)$$

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_{anN} \angle \frac{(-120^\circ + \alpha) + 120^\circ}{2} & V_{bn} &= V_{bnN} \angle -120^\circ + \alpha \\ V_{cn} &= V_{cn} \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (2.66)$$

Les taules 2.34 i 2.35 mostren els valors dels angles de les tensions de fase en graus i el VUF per un desequilibri tipus T8 per a la fase a. El valor de la tensió en totes les fases es igual a 1905,25 V ja que es un desequilibri tipus T8, on les tensions no es veuen afectades pel desequilibri sinó sols l'angle de dues de les fases. La taula 2.34 correspon a l'equació 2.61, i la taula 2.35 a l'equació 2.64.

	Tipus	$\angle V_{an}$	$\angle V_{bn}$	$\angle V_{cn}$	VUF(%)
T8(0,5%) B = C	8	0,00	-119,50	119,50	0,5%
T8(2%) B = C	8	0,00	-118,00	118,00	2,0%
T8(3,5%) B = C	8	0,00	-116,47	116,47	3,5%
T8(5%) B = C	8	0,00	-114,91	114,91	5,0%

Taula 2.34. Desequilibri tipus T7 per a la fase a (2.61).

	Tipus	$\angle V_{an}$	$\angle V_{bn}$	$\angle V_{cn}$	VUF(%)
T8(0,5%) B = C	8	0,00	-119,01	120,49	0,5%
T8(2%) B = C	8	0,00	-116,07	121,96	2,0%
T8(3,5%) B = C	8	0,00	-113,17	123,41	3,5%
T8(5%) B = C	8	0,00	-110,32	124,84	5,0%

Taula 2.35. Desequilibri tipus T7 per a la fase a (2.64).

2.6.3 Presentació del desequilibri de corrent (CUF)

Quan es té una variació en la tensió d'alimentació, cap dels debanats treballa sempre en les mateixes condicions, per tant el camp magnètic desenvolupat per aquest pot ser molt variat en funció de les tensions aplicades en les fases. Gràcies a això, es produeix un corrent diferent a cada fase.

S'analitza primerament per un sistema equilibrat, per comprovar que els valors que donen són pròxims als valors nominals. Com es pot veure en la taula 2.1 la corrent nominal és de 15,32 A i el valor obtingut per el sistema equilibrat es de 16 A. Un valor molt pròxim que demostra bé que els càlculs estan ben realitzats. En la taula 2.36 es mostren els resultats obtinguts per un sistema equilibrat.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
equilibrat	0	16,00	0,00	0,00

Taula 2.36. Valor del corrent de l'estator per la component directa i inversa en un sistema equilibrat

Tot seguit es mostren els resultats obtinguts de CUF pels diferents tipus de desequilibris que hi ha. Les taules també contenen els valors de la corrent d'estator per les components directa i inversa.

2.6.3.1 Desequilibri per caiguda de tensió

En aquest apartat es mostren els valors obtinguts al realitzar els càlculs del CUF dels tipus de desequilibris T1, T2 i T3.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T1(0,5%) FASE A	1	15,92	0,38	2,41%
T1(2%) FASE A	1	15,69	1,51	9,64%
T1(3,5%) FASE A	1	15,46	2,61	16,87%
T1(5%) FASE A	1	15,24	3,67	24,10%

Taula 2.37. CUF per un desequilibri tipus T1 amb caiguda de tensió a la fase a

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T2(0,5%) Va=VaN	2	15,84	0,38	2,41%
T2(2%) Va=VaN	2	15,38	1,48	9,64%
T2(3,5%) Va=VaN	2	14,95	2,52	16,87%
T2(5%) Va=VaN	2	14,55	3,51	24,10%

Taula 2.38. CUF per un desequilibri tipus T2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.31).

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T2(0,5%) Va=VaN	2	15,86	0,38	2,41%
T2(2%) Va=VaN	2	15,46	1,49	9,64%
T2(3,5%) Va=VaN	2	15,09	2,54	16,87%
T2(5%) Va=VaN	2	14,72	3,55	24,10%

Taula 2.39. CUF per un desequilibri tipus T2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.34).

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T3(0,5%) 0,98VaN	3	15,55	0,37	2,41%
T3(2%) 0,98VaN	3	15,16	1,46	9,64%
T3(3,5%) 0,98VaN	3	14,78	2,49	16,87%
T3(5%) 0,98VaN	3	14,43	3,48	24,10%

Taula 2.40. CUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 2% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T3(0,5%) 0,96VaN	3	15,23	0,37	2,41%
T3(2%) 0,96VaN	3	14,85	1,43	9,64%
T3(3,5%) 0,96VaN	3	14,48	2,44	16,87%
T3(5%) 0,96VaN	3	14,14	3,41	24,10%

Taula 2.41. CUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 4% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T3(0,5%) 0,94VaN	3	14,91	0,36	2,41%
T3(2%) 0,94VaN	3	14,54	1,40	9,64%
T3(3,5%) 0,94VaN	3	14,18	2,39	16,87%
T3(5%) 0,94VaN	3	13,84	3,34	24,10%

Taula 2.42. CUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 6% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T3(0,5%) 0,92VaN	3	14,59	0,35	2,41%
T3(2%) 0,92VaN	3	14,23	1,37	9,64%
T3(3,5%) 0,92VaN	3	13,88	2,34	16,87%
T3(5%) 0,92VaN	3	13,55	3,26	24,10%

Taula 2.43. CUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 8% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T3(0,5%) 0,90VaN	3	14,28	0,34	2,41%
T3(2%) 0,90VaN	3	13,92	1,34	9,64%
T3(3,5%) 0,90VaN	3	13,58	2,29	16,87%
T3(5%) 0,90VaN	3	13,25	3,19	24,10%

Taula 2.44. CUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 10% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T3(0,5%) 0,88VaN	3	13,96	0,34	2,41%
T3(2%) 0,88VaN	3	13,61	1,31	9,64%
T3(3,5%) 0,88VaN	3	13,28	2,24	16,87%
T3(5%) 0,88VaN	3	12,96	3,12	24,10%

Taula 2.45. CUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 12% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T3(0,5%) 0,86VaN	3	13,64	0,33	2,41%
T3(2%) 0,86VaN	3	13,30	1,28	9,64%
T3(3,5%) 0,86VaN	3	12,97	2,19	16,87%
T3(5%) 0,86VaN	3	12,66	3,05	24,10%

Taula 2.46. CUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 14% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T3(0,5%) 0,84VaN	3	13,32	0,32	2,41%
T3(2%) 0,84VaN	3	12,99	1,25	9,64%
T3(3,5%) 0,84VaN	3	12,67	2,14	16,87%
T3(5%) 0,84VaN	3	12,37	2,98	24,10%

Taula 2.47. CUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 16% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T3(0,5%) 0,82VaN	3	13,01	0,31	2,41%
T3(2%) 0,82VaN	3	12,68	1,22	9,64%
T3(3,5%) 0,82VaN	3	12,37	2,09	16,87%
T3(5%) 0,82VaN	3	12,07	2,91	24,10%

Taula 2.48. CUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 18% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T3(0,5%) 0,80VaN	3	12,69	0,31	2,41%
T3(2%) 0,80VaN	3	12,37	1,19	9,64%
T3(3,5%) 0,80VaN	3	12,07	2,04	16,87%
T3(5%) 0,80VaN	3	11,78	2,84	24,10%

Taula 2.49. CUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 20% a la fase a.

2.6.3.2 Desequilibri per sobretensió

En aquest apartat es mostren els valors obtinguts al realitzar els càlculs del CUF dels tipus de desequilibris T4, T5 i T6.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T4(0,5%) FASE A	4	16,08	0,39	2,41%
T4(2%) FASE A	4	16,33	1,57	9,64%
T4(3,5%) FASE A	4	16,58	2,80	16,87%
T4(5%) FASE A	4	16,84	4,06	24,10%

Taula 2.50. CUF per un desequilibri tipus T4, amb caiguda de tensió a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T5(0,5%) Va=VaN	5	16,16	0,39	2,41%
T5(2%) Va=VaN	5	16,67	1,61	9,64%
T5(3,5%) Va=VaN	5	17,20	2,90	16,87%
T5(5%) Va=VaN	5	17,78	4,28	24,10%

Taula 2.51. CUF per un desequilibri tipus 2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.46).

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T5(0,5%) Va=VaN	5	16,14	0,39	2,41%
T5(2%) Va=VaN	5	16,57	1,60	9,64%
T5(3,5%) Va=VaN	5	17,03	2,87	16,87%
T5(5%) Va=VaN	5	17,52	4,22	24,10%

Taula 2.52. CUF per un desequilibri tipus 2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.49).

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T6(0,5%) 1,02VaN	6	16,46	0,40	2,41%
T6(2%) 1,02VaN	6	16,91	1,63	9,64%
T6(3,5%) 1,02VaN	6	17,37	2,93	16,87%
T6(5%) 1,02VaN	6	17,87	4,31	24,10%

Taula 2.53. CUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 2% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T6(0,5%) 1,04VaN	6	16,79	0,40	2,41%
T6(2%) 1,04VaN	6	17,24	1,66	9,64%
T6(3,5%) 1,04VaN	6	17,71	2,99	16,87%
T6(5%) 1,04VaN	6	18,22	4,39	24,10%

Taula 2.54. CUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 4% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T6(0,5%) 1,06VaN	6	17,11	0,41	2,41%
T6(2%) 1,06VaN	6	17,57	1,69	9,64%
T6(3,5%) 1,06VaN	6	18,05	3,05	16,87%
T6(5%) 1,06VaN	6	18,57	4,47	24,10%

Taula 2.55. CUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 6% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T6(0,5%) 1,08VaN	6	17,43	0,42	2,41%
T6(2%) 1,08VaN	6	17,90	1,73	9,64%
T6(3,5%) 1,08VaN	6	18,40	3,10	16,87%
T6(5%) 1,08VaN	6	18,92	4,56	24,10%

Taula 2.56. CUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 8% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T6(0,5%) 1,10VaN	6	17,75	0,43	2,41%
T6(2%) 1,10VaN	6	18,23	1,76	9,64%
T6(3,5%) 1,10VaN	6	18,74	3,16	16,87%
T6(5%) 1,10VaN	6	19,27	4,64	24,10%

Taula 2.57. CUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 10% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T6(0,5%) 1,12VaN	6	18,08	0,44	2,41%
T6(2%) 1,12VaN	6	18,56	1,79	9,64%
T6(3,5%) 1,12VaN	6	19,08	3,22	16,87%
T6(5%) 1,12VaN	6	19,62	4,73	24,10%

Taula 2.58. CUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 12% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T6(0,5%) 1,14VaN	6	18,40	0,44	2,41%
T6(2%) 1,14VaN	6	18,89	1,82	9,64%
T6(3,5%) 1,14VaN	6	19,42	3,28	16,87%
T6(5%) 1,14VaN	6	19,97	4,81	24,10%

Taula 2.59. CUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 14% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T6(0,5%) 1,16VaN	6	18,72	0,45	2,41%
T6(2%) 1,16VaN	6	19,23	1,85	9,64%
T6(3,5%) 1,16VaN	6	19,76	3,33	16,87%
T6(5%) 1,16VaN	6	20,32	4,90	24,10%

Taula 2.60. CUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 16% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T6(0,5%) 1,18VaN	6	19,04	0,46	2,41%
T6(2%) 1,18VaN	6	19,56	1,89	9,64%
T6(3,5%) 1,18VaN	6	20,10	3,39	16,87%
T6(5%) 1,18VaN	6	20,67	4,98	24,10%

Taula 2.61. CUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 18% a la fase a.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T6(0,5%) 1,20VaN	6	19,37	0,47	2,41%
T6(2%) 1,20VaN	6	19,89	1,92	9,64%
T6(3,5%) 1,20VaN	6	20,44	3,45	16,87%
T6(5%) 1,20VaN	6	21,02	5,07	24,10%

Taula 2.62. CUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 20% a la fase a.

2.6.3.3 Desequilibri per variació d'angle

En aquest apartat es mostren els valors obtinguts al realitzar els càlculs del CUF dels tipus de desequilibris T7 i T8.

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T7(0,5%) FASE A	7	16,00	0,39	2,41%
T7(2%) FASE A	7	15,99	1,54	9,64%
T7(3,5%) FASE A	7	15,98	2,70	16,87%
T7(5%) FASE A	7	15,96	3,85	24,10%

Taula 2.63. CUF per un desequilibri tipus T7 per a la fase a

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T8(0,5%) B = C	8	16,00	0,39	2,41%
T8(2%) B = C	8	15,99	1,54	9,64%
T8(3,5%) B = C	8	15,98	2,70	16,87%
T8(5%) B = C	8	15,96	3,85	24,10%

Taula 2.64. CUF per un desequilibri tipus T7 per a la fase a (2.61).

	Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
T8(0,5%) B = C	8	16,00	0,39	2,41%
T8(2%) B = C	8	15,99	1,54	9,64%
T8(3,5%) B = C	8	15,98	2,70	16,87%
T8(5%) B = C	8	15,96	3,85	24,10%

Taula 2.65. CUF per un desequilibri tipus T7 per a la fase a (2.64).

2.6.4 Presentació del desequilibri del parell (TUF)

Quan es té una variació en la tensió d'alimentació, com s'ha dit abans es produeix un corrent diferent en cada fase. A conseqüència d'aquesta variació del corrent provoca que el parell es vegi també afectat. Un desequilibri de tensió pot provocar una inestabilitat en el parell, i al mateix temps es produeixen forces magnètiques desiguals que actuen sobre el rotor i repercuteix sobre l'eix amb petits moviments d'aquest.

	Tipus	T1	T2	T	TUF(%)
equilibrat	0	513,05	0,00	513,05	0,000%

Taula 2.66. Valor del parell en un sistema equilibrat

En la taula 2.66 es mostren els valors obtinguts del parell total, el parell per la component directa i el parell per la component inversa i també el desequilibri de parell (TUF) per un sistema equilibrat. Amb el que es pot comprovar el parell nominal obtingut.

El valor obtingut del parell és de 513,05 Nm, un valor molt pròxim al parell nominal que és de 492.2 Nm. El que demostra que els càlculs estan ben realitzats ja que quan és un sistema equilibrat els valors són pròxims als nominals.

2.6.4.1 Desequilibri per caiguda de tensió

En les següents taules es mostren els resultats obtinguts del parell per la component directa i inversa, i el TUF obtingut pels desequilibris tipus T1, T2 i T3 per a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T1(0,5%) FASE A	1	507,96	0,00	0,001%
T1(2%) FASE A	1	493,13	0,07	0,015%
T1(3,5%) FASE A	1	478,94	0,22	0,045%
T1(5%) FASE A	1	465,35	0,43	0,093%

Taula 2.67. TUF per un desequilibri tipus T1 amb caiguda de tensió a la fase a

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T2(0,5%) Va=VaN	2	502,94	0,00	0,001%
T2(2%) Va=VaN	2	474,34	0,07	0,015%
T2(3,5%) Va=VaN	2	448,12	0,20	0,045%
T2(5%) Va=VaN	2	424,01	0,39	0,093%

Taula 2.68. TUF per un desequilibri tipus T2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.31).

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T2(0,5%) Va=VaN	2	504,28	0,00	0,001%
T2(2%) Va=VaN	2	479,27	0,07	0,015%
T2(3,5%) Va=VaN	2	456,08	0,21	0,045%
T2(5%) Va=VaN	2	434,53	0,40	0,093%

Taula 2.69. TUF per un desequilibri tipus T2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.34).

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T3(0,5%) 0,98VaN	3	484,31	0,00	0,001%
T3(2%) 0,98VaN	3	460,29	0,07	0,015%
T3(3,5%) 0,98VaN	3	438,02	0,20	0,045%
T3(5%) 0,98VaN	3	417,32	0,39	0,093%

Taula 2.70. TUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 2% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T3(0,5%) 0,96VaN	3	464,74	0,00	0,001%
T3(2%) 0,96VaN	3	441,69	0,07	0,015%
T3(3,5%) 0,96VaN	3	420,32	0,19	0,045%
T3(5%) 0,96VaN	3	400,46	0,37	0,093%

Taula 2.71. TUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 4% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T3(0,5%) 0,94VaN	3	445,58	0,00	0,001%
T3(2%) 0,94VaN	3	423,48	0,06	0,015%
T3(3,5%) 0,94VaN	3	402,99	0,18	0,045%
T3(5%) 0,94VaN	3	383,95	0,36	0,093%

Taula 2.72. TUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 6% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T3(0,5%) 0,92VaN	3	426,82	0,00	0,001%
T3(2%) 0,92VaN	3	405,65	0,06	0,015%
T3(3,5%) 0,92VaN	3	386,02	0,18	0,045%
T3(5%) 0,92VaN	3	367,79	0,34	0,093%

Taula 2.73. TUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 8% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T3(0,5%) 0,90VaN	3	408,47	0,00	0,001%
T3(2%) 0,90VaN	3	388,21	0,06	0,015%
T3(3,5%) 0,90VaN	3	369,42	0,17	0,045%
T3(5%) 0,90VaN	3	351,97	0,33	0,093%

Taula 2.74. TUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 10% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T3(0,5%) 0,88VaN	3	390,51	0,00	0,001%
T3(2%) 0,88VaN	3	371,15	0,05	0,015%
T3(3,5%) 0,88VaN	3	353,19	0,16	0,045%
T3(5%) 0,88VaN	3	336,50	0,31	0,093%

Taula 2.75. TUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 12% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T3(0,5%) 0,86VaN	3	372,96	0,00	0,001%
T3(2%) 0,86VaN	3	354,47	0,05	0,015%
T3(3,5%) 0,86VaN	3	337,31	0,15	0,045%
T3(5%) 0,86VaN	3	321,38	0,30	0,093%

Taula 2.76. TUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 14% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T3(0,5%) 0,84VaN	3	355,82	0,00	0,001%
T3(2%) 0,84VaN	3	338,17	0,05	0,015%
T3(3,5%) 0,84VaN	3	321,81	0,15	0,045%
T3(5%) 0,84VaN	3	306,60	0,28	0,093%

Taula 2.77. TUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 16% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T3(0,5%) 0,82VaN	3	339,08	0,00	0,001%
T3(2%) 0,82VaN	3	322,26	0,05	0,015%
T3(3,5%) 0,82VaN	3	306,67	0,14	0,045%
T3(5%) 0,82VaN	3	292,18	0,27	0,093%

Taula 2.78. TUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 18% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T3(0,5%) 0,80VaN	3	322,74	0,00	0,001%
T3(2%) 0,80VaN	3	306,73	0,05	0,015%
T3(3,5%) 0,80VaN	3	291,89	0,13	0,045%
T3(5%) 0,80VaN	3	278,10	0,26	0,093%

Taula 2.79. TUF per un desequilibri tipus T3, amb caiguda de tensió del 20% a la fase a.

2.6.4.2 Desequilibri per sobretensió

En les següents taules es mostren els resultats obtinguts del parell per la component directa i inversa, i el TUF obtingut pels desequilibris tipus T4, T5 i T6 per a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T4(0,5%) FASE A	4	518,22	0,00	0,001%
T4(2%) FASE A	4	534,20	0,08	0,015%
T4(3,5%) FASE A	4	550,94	0,25	0,045%
T4(5%) FASE A	4	568,48	0,53	0,093%

Taula 2.80. TUF per un desequilibri tipus T4, amb caiguda de tensió a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T5(0,5%) Va=VaN	5	523,47	0,00	0,001%
T5(2%) Va=VaN	5	556,70	0,08	0,015%
T5(3,5%) Va=VaN	5	593,19	0,27	0,045%
T5(5%) Va=VaN	5	633,39	0,59	0,093%

Taula 2.81. TUF per un desequilibri tipus 2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.46).

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T5(0,5%) Va=VaN	5	522,05	0,00	0,001%
T5(2%) Va=VaN	5	550,53	0,08	0,015%
T5(3,5%) Va=VaN	5	581,40	0,26	0,045%
T5(5%) Va=VaN	5	614,95	0,57	0,093%

Taula 2.82. TUF per un desequilibri tipus 2 amb caiguda de tensió a les fases b i c (2.49).

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T6(0,5%) 1,02VaN	6	543,14	0,01	0,001%
T6(2%) 1,02VaN	6	572,77	0,08	0,015%
T6(3,5%) 1,02VaN	6	604,89	0,27	0,045%
T6(5%) 1,02VaN	6	639,79	0,59	0,093%

Taula 2.83. TUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 2% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T6(0,5%) 1,04VaN	6	564,65	0,01	0,001%
T6(2%) 1,04VaN	6	595,46	0,09	0,015%
T6(3,5%) 1,04VaN	6	628,85	0,29	0,045%
T6(5%) 1,04VaN	6	665,13	0,62	0,093%

Taula 2.84. TUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 4% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T6(0,5%) 1,06VaN	6	586,58	0,01	0,001%
T6(2%) 1,06VaN	6	618,58	0,09	0,015%
T6(3,5%) 1,06VaN	6	653,27	0,30	0,045%
T6(5%) 1,06VaN	6	690,96	0,64	0,093%

Taula 2.85. TUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 6% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T6(0,5%) 1,08VaN	6	608,92	0,01	0,001%
T6(2%) 1,08VaN	6	642,14	0,10	0,015%
T6(3,5%) 1,08VaN	6	678,15	0,31	0,045%
T6(5%) 1,08VaN	6	717,28	0,66	0,093%

Taula 2.86. TUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 8% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T6(0,5%) 1,10VaN	6	631,69	0,01	0,001%
T6(2%) 1,10VaN	6	666,14	0,10	0,015%
T6(3,5%) 1,10VaN	6	703,50	0,32	0,045%
T6(5%) 1,10VaN	6	744,09	0,69	0,093%

Taula 2.87. TUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 10% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T6(0,5%) 1,12VaN	6	654,86	0,01	0,001%
T6(2%) 1,12VaN	6	690,59	0,10	0,015%
T6(3,5%) 1,12VaN	6	729,31	0,33	0,045%
T6(5%) 1,12VaN	6	771,40	0,71	0,093%

Taula 2.88. TUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 12% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T6(0,5%) 1,14VaN	6	678,46	0,01	0,001%
T6(2%) 1,14VaN	6	715,47	0,11	0,015%
T6(3,5%) 1,14VaN	6	755,59	0,34	0,045%
T6(5%) 1,14VaN	6	799,19	0,74	0,093%

Taula 2.89. TUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 14% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T6(0,5%) 1,16VaN	6	702,48	0,01	0,001%
T6(2%) 1,16VaN	6	740,79	0,11	0,015%
T6(3,5%) 1,16VaN	6	782,34	0,35	0,045%
T6(5%) 1,16VaN	6	827,48	0,77	0,093%

Taula 2.90. TUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 16% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T6(0,5%) 1,18VaN	6	726,91	0,01	0,001%
T6(2%) 1,18VaN	6	766,56	0,11	0,015%
T6(3,5%) 1,18VaN	6	809,55	0,37	0,045%
T6(5%) 1,18VaN	6	856,26	0,79	0,093%

Taula 2.91. TUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 18% a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T6(0,5%) 1,20VaN	6	751,76	0,01	0,001%
T6(2%) 1,20VaN	6	792,76	0,12	0,015%
T6(3,5%) 1,20VaN	6	837,22	0,38	0,045%
T6(5%) 1,20VaN	6	885,53	0,82	0,093%

Taula 2.92. TUF per un desequilibri tipus T6, amb sobretensió del 20% a la fase a.

2.6.4.3 Desequilibri per variació d'angle

En les següents taules es mostren els resultats obtinguts del parell per la component directa i inversa, i el TUF obtingut pels desequilibris tipus T7 i T8.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T7(0,5%) FASE A	7	513,02	0,00	0,001%
T7(2%) FASE A	7	512,64	0,08	0,015%
T7(3,5%) FASE A	7	511,80	0,23	0,045%
T7(5%) FASE A	7	510,50	0,47	0,093%

Taula 2.93. TUF per un desequilibri tipus T7 per a la fase a.

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T8(0,5%) B = C	8	513,02	0,00	0,001%
T8(2%) B = C	8	512,63	0,08	0,015%
T8(3,5%) B = C	8	511,75	0,23	0,045%
T8(5%) B = C	8	510,36	0,47	0,093%

Taula 2.94. TUF per un desequilibri tipus T7 per a la fase a (2.61).

	Tipus	T1	T2	TUF(%)
T8(0,5%) B = C	8	513,02	0,00	0,001%
T8(2%) B = C	8	512,65	0,08	0,015%
T8(3,5%) B = C	8	511,84	0,23	0,045%
T8(5%) B = C	8	510,62	0,47	0,093%

Taula 2.95. CUF per un desequilibri tipus T7 per a la fase a (2.64).

2.6.5 Presentació del valor mig de la tensió

En aquest apartat es mostren els valors mitjos obtinguts de la tensió de línia per cada tipologia. Com es produeix un desequilibri de tensió, les tres fases ja no són iguals i repercuteix en el valor mig de les tensions.

En la taula 2.96 apareixen els valors obtinguts per les tres línies i el valor mig de elles. Com és un sistema equilibrat les tres fases tenen la mateixa tensió i llavors el valor mig són els 3300 V de tensió nominal.

Tipus	Vab	Vbc	Vca	Vmig
0	3300	3300	3300	3.300

Taula 2.96. Valor mig de la tensió per un sistema equilibrat

Tot seguit en les taules següents, hi ha els valors obtinguts del valor mig de la tensió per les diferents tipologies de desequilibri, i es pot veure com els tipus de desequilibris que més afecten sobre el valor mig de la tensió són les tipus T3 i T6.

	Tipus	Vab	Vbc	Vca	Vmig
T1(0,5%) FASE A	1	3275	3300	3275	3.284
T1(2%) FASE A	1	3203	3300	3203	3.236
T1(3,5%) FASE A	1	3134	3300	3134	3.189
T1(5%) FASE A	1	3067	3300	3067	3.145

Taula 2.97. Valor mig de la tensió per un desequilibri tipus T1.

	Tipus	Vab	Vbc	Vca	Vmig
T2(0,5%) Va=VaN	2	3276	3251	3276	3.267
T2(2%) Va=VaN	2	3205	3110	3205	3.173
T2(3,5%) Va=VaN	2	3139	2976	3139	3.085
T2(5%) Va=VaN	2	3078	2850	3078	3.002

Taula 2.98. Valor mig de la tensió per un desequilibri tipus T2.

	Tipus	Vab	Vbc	Vca	Vmig
T3(0,5%) 0,98VaN	3	3206	3192	3220	3.206
T3(2%) 0,98VaN	3	3126	3072	3180	3.126
T3(3,5%) 0,98VaN	3	3051	2957	3142	3.050
T3(5%) 0,98VaN	3	2980	2848	3106	2.978

Taula 2.99. Valor mig de la tensió per un desequilibri tipus T3.

	Tipus	Vab	Vbc	Vca	Vmig
T4(0,5%) FASE A	4	3325	3300	3325	3.317
T4(2%) FASE A	4	3402	3300	3402	3.368
T4(3,5%) FASE A	4	3481	3300	3481	3.421
T4(5%) FASE A	4	3564	3300	3564	3.476

Taula 2.100. Valor mig de la tensió per un desequilibri tipus T4.

	Tipus	Vab	Vbc	Vca	Vmig
T5(0,5%) Va=VaN	5	3325	3350	3325	3.333
T5(2%) Va=VaN	5	3404	3506	3404	3.438
T5(3,5%) Va=VaN	5	3488	3673	3488	3.549
T5(5%) Va=VaN	5	3579	3850	3579	3.669

Taula 2.101. Valor mig de la tensió per un desequilibri tipus T5.

	Tipus	Vab	Vbc	Vca	Vmig
T6(0,5%) 1,02VaN	6	3395	3410	3381	3.395
T6(2%) 1,02VaN	6	3487	3547	3427	3.487
T6(3,5%) 1,02VaN	6	3585	3692	3475	3.584
T6(5%) 1,02VaN	6	3690	3846	3527	3.687

Taula 2.102. Valor mig de la tensió per un desequilibri tipus T6.

	Tipus	Vab	Vbc	Vca	Vmig
T7(0,5%) FASE A	7	3314	3300	3286	3.300
T7(2%) FASE A	7	3356	3300	3241	3.299
T7(3,5%) FASE A	7	3395	3300	3196	3.297
T7(5%) FASE A	7	3433	3300	3148	3.294

Taula 2.103. Valor mig de la tensió per un desequilibri tipus T7.

	Tipus	Vab	Vbc	Vca	Vmig
T8(0,5%) B = C	8	3292	3316	3292	3.300
T8(2%) B = C	8	3266	3365	3266	3.299
T8(3,5%) B = C	8	3240	3411	3240	3.297
T8(5%) B = C	8	3212	3456	3212	3.293

Taula 2.104. Valor mig de la tensió per un desequilibri tipus T8.

2.6.6 Anàlisi dels resultats

En aquest apartat s'analitzaran els resultats obtinguts gràcies a les gràfiques obtingudes mitjançant el programa de càlcul Microsoft Excel 2010.

La figura 2.15 mostra la comparació entre els valors obtinguts de CUF i els de VUF. Es pot veure com quan augmenta el VUF va augmentant el CUF. Amb un 2% de VUF,

límit per considerar un sistema equilibrat, el CUF arriba al 10% de desequilibri. Fins arribar a un 25% de desequilibri amb un VUF del 25%.

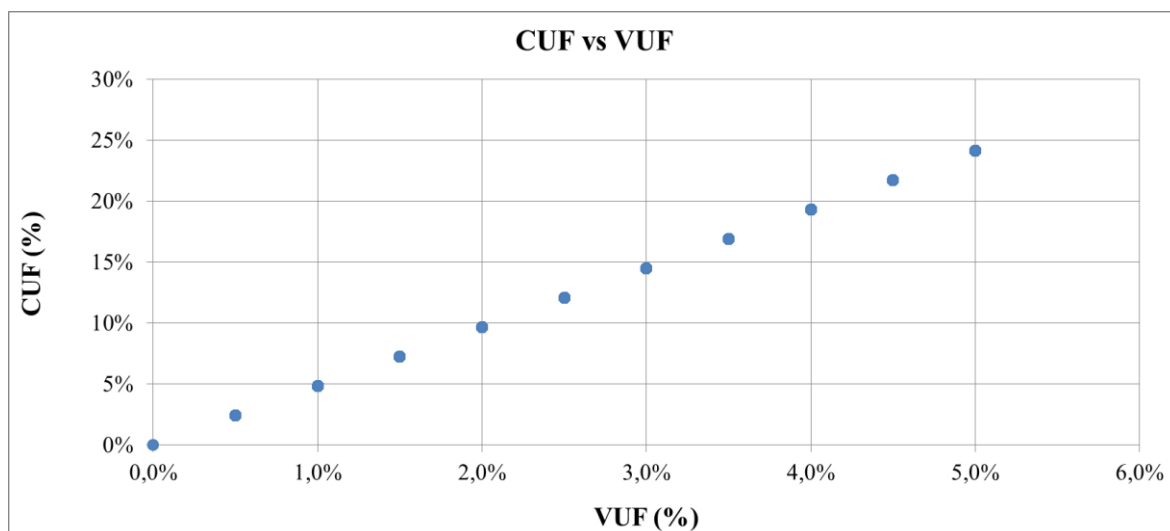


Figura 2.15. Comparació entre els valors de VUF i els valors de CUF.

A continuació en la figura 2.16 es mostra la comparació entre el valor de CUF i el tipus de desequilibri. Tots els tipus de desequilibris tenen els mateixos valors de CUF per els mateixos valors de VUF. Encara que sols es vegi un sol punt per cada VUF, això es degut a que els diferents punts calculats estan interposats sobre els altres. Aquests valors donen semblants perquè el càlcul està realitzat en règim permanent.

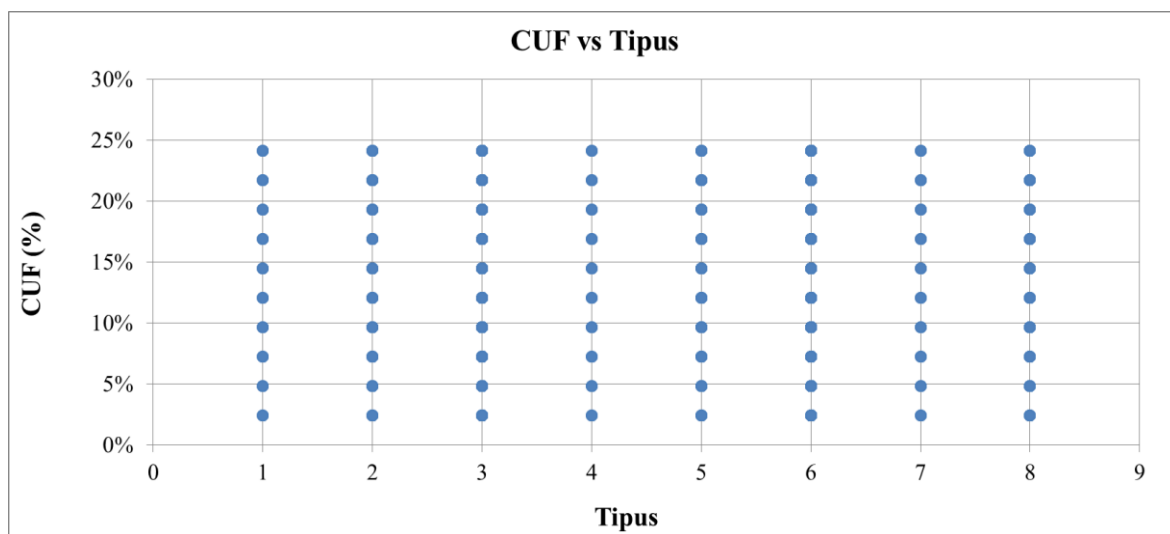


Figura 2.16. Comparació entre el valor de CUF i el tipus de desequilibri.

La figura 2.17 ensenya la comparació entre el valor de CUF i el tipus de desequilibri per un VUF del 2%. En la figura els valors de tots els tipus de desequilibris donen tots un 10% de desequilibri de corrent, sense que es puguin diferenciar tots els punts calculats. Això es degut a que els càlculs estan realitzats en el model equivalent en règim permanent i no en règim dinàmic, que es podrien veure grans diferències segons el tipus de desequilibri. Llavors realitzant els càlculs en règim permanent s'obté el valor mig del CUF que dona en règim dinàmic.

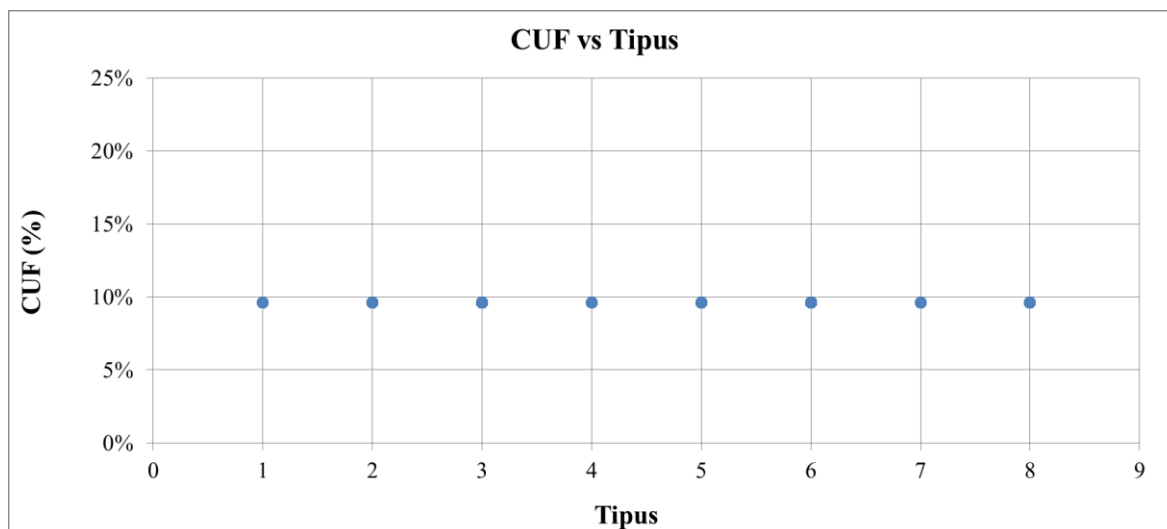


Figura 2.17. Comparació entre el valor de CUF i el tipus de desequilibri per un VUF del 2%.

En la figura 2.18 es pot veure la comparació entre el valor mig de la tensió i el CUF. El valor màxim de CUF arriba al 25%, que és quan hi ha més variació del valor mig de la tensió. Per un valor de CUF del 25% hi ha valors mitjos de tensió de 2400V fins 4400V, això es degut als diferents tipus de tipologies. Els valors de les tipologies T7 i T8 tenen valors pròxims de valor mig de tensió al de la tensió nominal de 3300V.

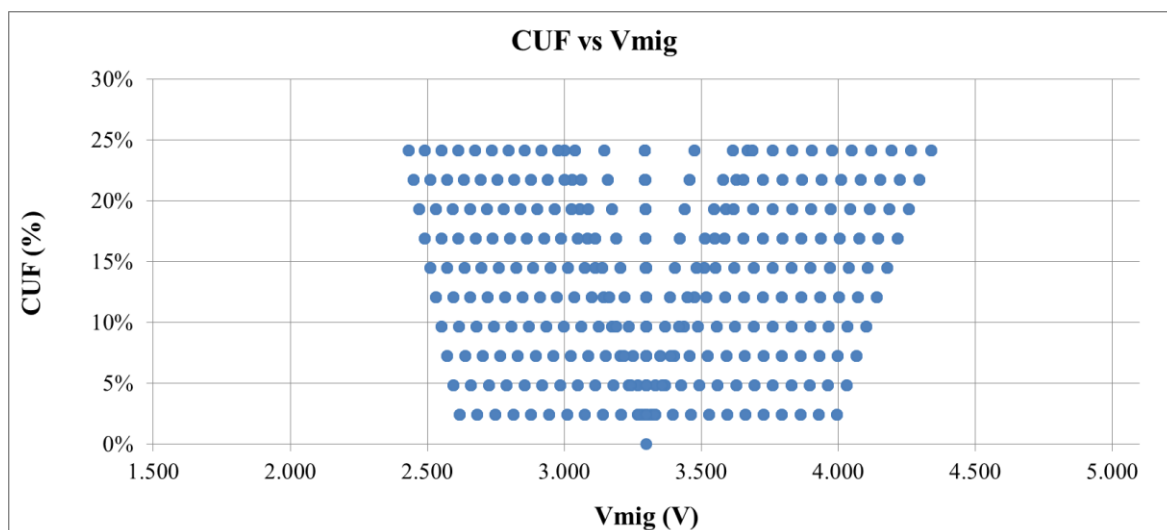


Figura 2.18. Comparació entre el valor mig de tensió i el valor de CUF.

Les tipologies T1, T2, T4 i T5 també estan pròxims al valor mig de la tensió nominal però com més desequilibri hi ha, aquesta variació respecte el valor nominal augmenta. També es degut que estiguin prop de la tensió nominal perquè són tipologies que tenen poca maniobra per agafar diferents desequilibris ja que el desequilibri afecta a una o dos fases. Les tipologies T3 i T6 com afecten a les tres fases doncs hi ha més maniobres de desequilibris. L'interval de valors mitjos de tensions va dels 2500V als 3000V per la tipologia T3 perquè aquesta tipologia compren valors de caiguda de tensió i els valors són inferiors a la nominal. En canvi per la tipologia T6 els valors compresos de tensions van de 3500V a 4000V perquè compren valors de sobretensió i aquests són superiors a la tensió nominal.

En la figura 2.19 es compara el desequilibri del parell (TUF) amb el desequilibri en la tensió (VUF). El TUF va augmentant conforme va augmentant el VUF. Amb un VUF del 2% el TUF arriba a un 0,015%. Aquests valors són molt petits degut a que el valor del parell es bastant gran, i la diferencia entre la component directa i inversa del parell es gran i llavors el valor del TUF es petit. Si el valor del parell fos més gran aquest valor de desequilibri seria encara més petit.

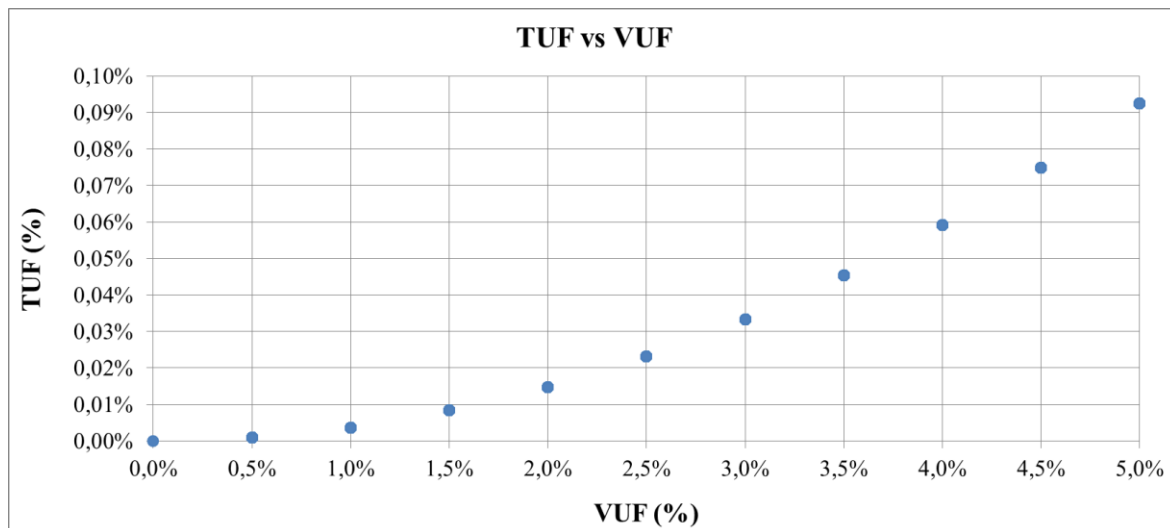


Figura 2.19. Comparació entre el valor de TUF i el valor de VUF.

La figura 2.20 es realitza la comparació entre el TUF i el tipus de desequilibri. Es pot veure com els valors de TUF són molt baixos, força arriben al 0,10% amb el 5% de VUF. També com en el cas del CUF es pot veure com el tipus de desequilibri no influeix en el valor del TUF. Aquests resultats són deguts a que la realització dels càlculs estan realitzats amb un circuit equivalent en règim permanent i llavors sols es pot tenir una visió orientativa dels valors que dona. Ja que en règim dinàmic els resultats donarien pròxims en aquests però amb variacions respecte el tipus.

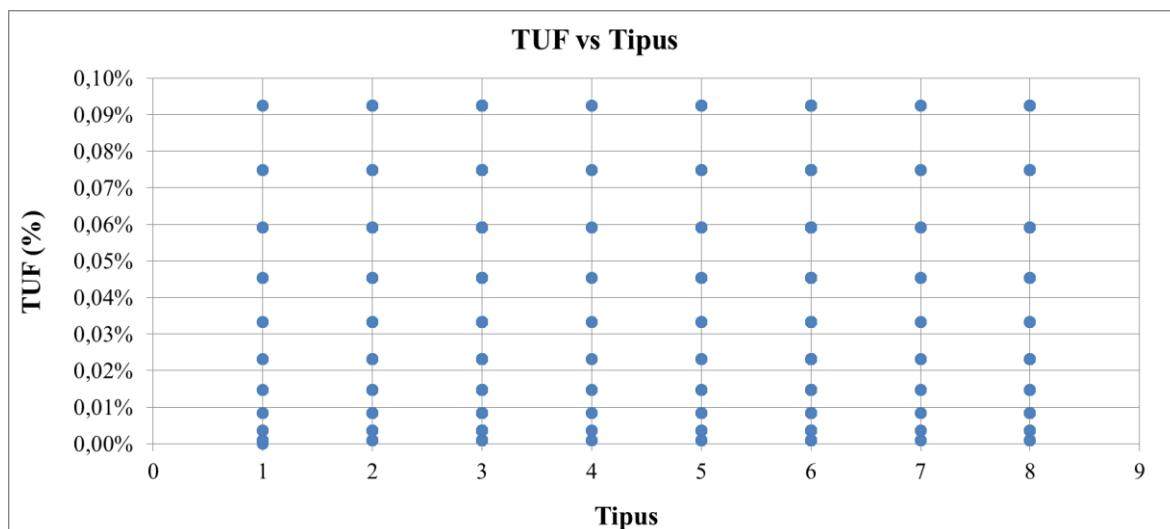


Figura 2.20. Comparació entre el valor de TUF i el tipus de desequilibri..

La figura 2.21 és una especificació de la figura 2.21, ja que mostra una comparació entre el valor de TUF i el tipus de desequilibri per un VUF del 2%. En aquest cas es pot veure com per un VUF determinat s'obté el mateix valor de TUF.

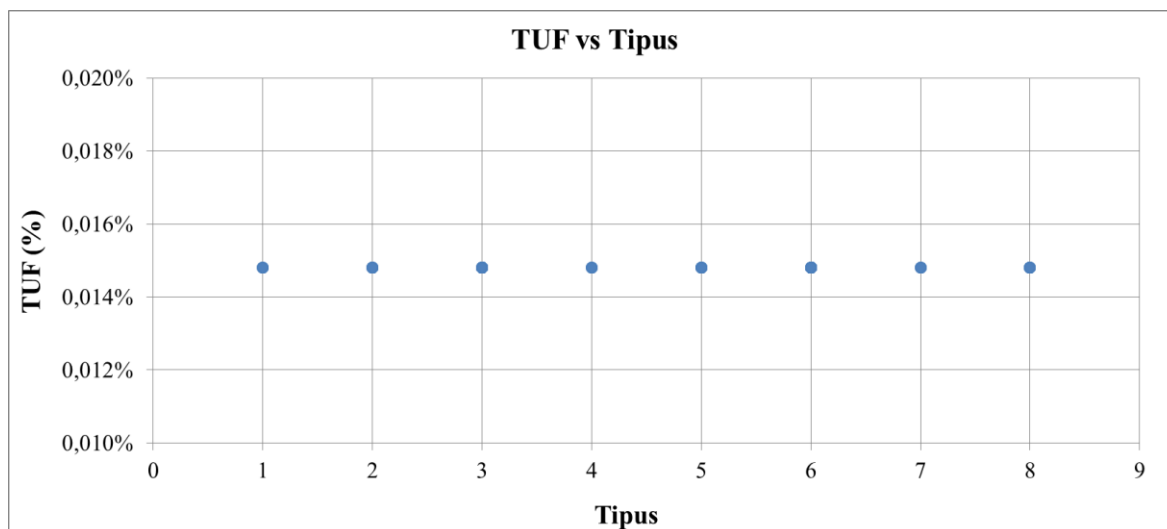


Figura 2.21. Comparació entre el valor de TUF i el tipus de desequilibri per un VUF del 2%.

En la següent figura, en la 2.22 es comparen el valor mig de tensió amb el valor de TUF. Es fàcil de veure que inicialment amb valors de VUF baixos fins al 3% arriba a un 0,03% de TUF. Es per desequilibris de tensió més grans que el valor del TUF pot arribar a un 0,09% amb un 5% de desequilibri de tensió.

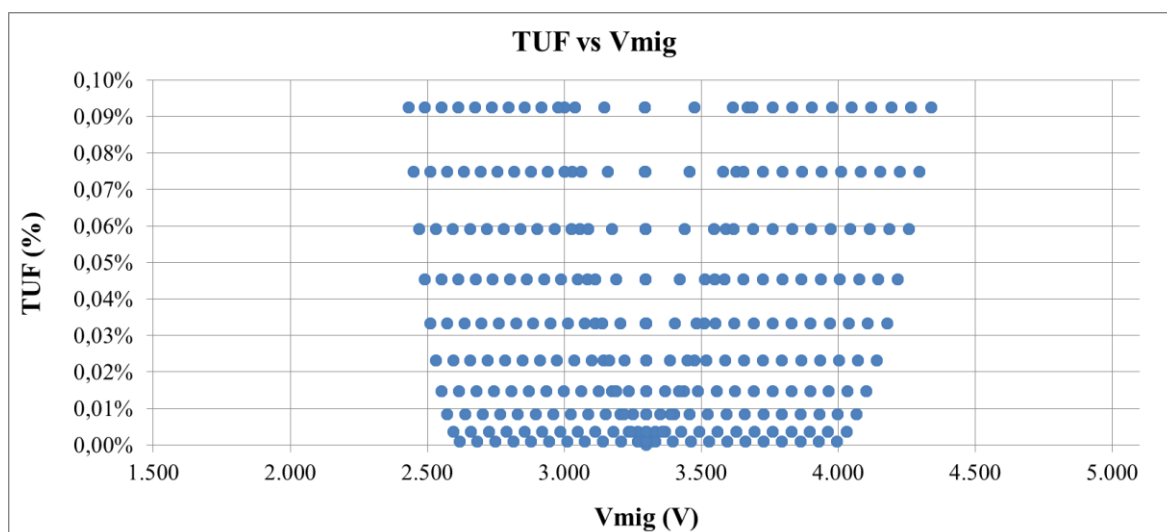


Figura 2.22. Comparació entre el valor mig de tensió i el valor de TUF.

Finalment en la figura 2.23 es pot veure la comparació entre el TUF i el CUF. Si el valor del desequilibri de corrent augmenta el desequilibri de parell també augmenta. Aquest augment es comporta de manera lineal

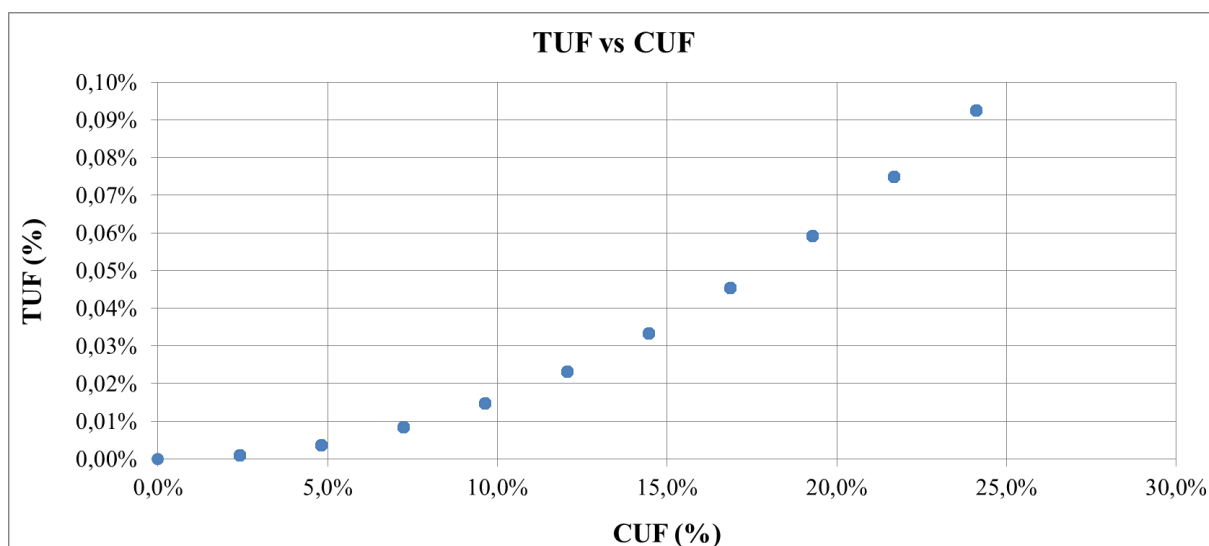


Figura 2.23. Comparació entre el valor de TUF i el valor de CUF.

2.6.7 Conclusions

En aquest projecte s'ha pogut comprovar com els desequilibris de tensió en un motor d'inducció trifàsic afecten tant al corrent com al parell provocant desequilibris en aquest. Sent els desequilibris de tipus T3 i T6 els que afecten més sobre la tensió ja que afecten a les tres fases i la variació del valor mig és més gran com es pot veure a la figura 2.16.

També cal afegir que quan el desequilibri de tensió augmenta, tant el desequilibri de corrent com de tensió augmenten modificant considerablement el valor del parell o de la corrent.

El desequilibri del parell per petits desequilibris de tensió (0,5% - 3%) no es molt elevat per això en alguns casos es fins el 3% que no es considera un sistema desequilibrat, i per desequilibris de tensió més grans del 3% provoca un gran augment o disminució en el parell.

Cal afegir que els càlculs realitzats en el present treball han estat realitzats amb un circuit equivalent en règim permanent, el que provoca que els resultats s'apropin bastant als resultats obtinguts en altres treballs realitzats amb programes de càlcul que utilitzen sistemes equivalents en règim dinàmic. Però el que permet aquest treball es veure com aquests càlculs són molt pròxims en aquests, ja que ens permet tindre una visió de com es comporta un motor d'inducció en gàbia d'esquirol a diferents desequilibris de tensió.

Finalment en el treball s'han realitzat 870 punts de desequilibris, que han permès avaluar el seu comportament, ja que si s'haguessin realitzat més punts de desequilibri s'hagués arribat finalment a la mateixa conclusió ja que els càlculs estan realitzats en un model en règim permanent com s'ha dit anteriorment.

2.6.8 Programa de càlcul

- Microsoft Excel 2010

2.6.9 Pla de gestió de la qualitat durant la redacció del treball

En aquest treball, per tal d'assegurar la seva qualitat s'han realitzat diferents revisions periòdiques perquè els resultats dels càlculs siguin el més correctes possibles. També per garantir una millor qualitat del treball, els càlculs realitzats s'han comparat amb altres càlculs realitzats.

2.7 Definicions i abreviatures

LVUR, line voltage unbalance rate

PVUR, phase voltage unbalance rate

VUF, voltage unbalance factor

CVUF, complex voltatge unbalance factor

CUF, current unbalance factor

TUF, torque unbalance factor

T1 (1 Φ -UV): una fase en desequilibri per caiguda de tensió.

T2 (2 Φ -UV): dos fases en desequilibri per caiguda de tensió.

T3 (3 Φ -UV): tres fases en desequilibri per caiguda de tensió.

T4 (1 Φ -OV): una fase en desequilibri per sobretensió.

T5 (2 Φ -OV): dos fases en desequilibri per sobretensió.

T6 (3 Φ -OV): tres fases en desequilibri per sobretensió.

T7 (1 Φ -A): desequilibri per variació d'angle en una fase

T8 (2 Φ -A): desequilibri per variació d'angle en dos fases.

s, lliscament

n_1 , velocitat de sincronisme de la màquina

n , velocitat del motor

n_{1d} , velocitat de sincronisme de la màquina per la component directa

n_{1i} , velocitat de sincronisme de la màquina per la component inversa

s_d , lliscament directe

s_i , lliscament invers

ω_{1d} , velocitat de sincronisme de la màquina per la component directa en rad/s.

ω_{1i} , velocitat de sincronisme de la màquina per la component inversa en rad/s.

V_s , tensió en l'estator de fase.

R_s , resistència de l'estator.

X_s , reactància de l'estator.

X_m , reactància magnetitzant.

R_r , resistència del rotor.

X_r , reactància del rotor.

V_{th} , tensió de Thevenin.

Z_{th} , impedància de Thevenin.

R_{th} , resistència de Thevenin.

X_{th} , reactància de Thevenin.

I_r , corrent del rotor.

T , parell motor.

T_1 , parell directe del motor.

T_2 , parell invers del motor.

ω_s , velocitat síncrona del motor en rad/s

I_s , corrent de l'estator.

I_{s1} , corrent directa de l'estator

I_{s2} , corrent inversa de l'estator.

Z_p , impedància del paral·lel entre rotor i reactància magnetitzant.

V_0 , tensió de la component homopolar

V_1 , tensió de la component directa

V_2 , tensió de la component indirecta

2.8 Normes i referències

- [1] IEC 61000-2-2; Versión Oficial en español – Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión.
- [2] IEEE Standard 1250-1995: Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances.
- [3] UNE-EN 50160: Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.
- [4] UNE-EN 60034: Maquinas eléctricas rotativas
- [5] España. Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. Boletín Oficial del Estado, 27 de diciembre de 2000, núm. 310, p. 45988.
- [6] España. Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico. Boletín Oficial del Estado, 28 de noviembre de 1997, núm.285, p.35097.
- [7] Jesús Fraile Mora, Maquinas eléctricas, McGrawHill, quinta edición, 2003.
- [8] Ching-Yin Lee; Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-phase Induction Motor; IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, Vol. 14, No. 2.
- [9] Stephen J. Chapman; Maquinas electricas; McGrawHill, tercera edición, 2000.
- [10] Adolfo Andrés Jaramillo Matta, Efecto de las perturbaciones: huecos de tensión, desequilibrios de tensión y armónicos, en los motores de inducción con rotor de Jaula de Ardilla, Revista Inge@uan, 2013, Vol. 4, No. 7, pàgines: 36-51.

- [11] Projecte Fi de Carrera: *Efecte dels desequilibris en l'alimentació d'un motor d'inducció trifàsic*; juny 2012; Oscar Salvador Fernández; Enginyeria Tècnica Industrial en Electricitat.



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI

Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

Càlcul dels efectes dels desequilibris de tensió en un motor d'inducció trifàsic

3. Annex

TITULACIÓ: Grau d'Enginyeria Elèctrica

AUTOR: Jose Lorente Vall

DIRECTOR: Luis Guasch Pesquer

DATA: Juny / 2014

Índex annex

3	Annex	86
3.1	Càlculs	86
3.1.1	Càlcul de la tensió de fase i de línia del motor.....	86
3.1.2	Càlcul del valor mig de tensió.....	89
3.1.3	Càlcul del desequilibri de tensió (VUF).....	90
3.1.4	Càlcul del desequilibri de corrent (CUF)	95
3.1.5	Càlcul del desequilibri del parell (TUF)	96

3 Annex

3.1 Càlculs

Tot seguit en aquest apartat es mostren els diferents càlculs realitzats en un punt de desequilibri.

3.1.1 Càlcul de la tensió de fase i de línia del motor.

El motor d'inducció en gàbia d'esquirol està alimentat a una tensió de 3300 V. Aquesta tensió és de línia ja que és més fàcil d'obtenir que la de fase. També cal afegir que aquest motor està connectat en estrella i llavors la seva tensió de fase es veurà afectada. L'equació 3.1 mostra la relació que hi ha entre el valor eficaç i el valor de pic de la tensió. Els 3300 V que alimenten al motor són de valor eficaç.

$$V_{eficaç} = \frac{V_{pic}}{\sqrt{2}} \quad (3.1)$$

Per poder realitzar els càlculs dels circuits equivalents en fase, aquesta tensió s'ha de de passar a valor de fase utilitzant l'equació 3.2. La formula és la següent ja que el motor d'inducció en gàbia d'esquirol està connectat en estrella i llavors la tensió de fase es $\sqrt{3}$ vegades inferior a la tensió de línia.

$$V_{eficaç fase} = \frac{V_{eficaç línia}}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

A continuació es mostra un càlcul d'exemple sobre el valor eficaç de fase. Agafarem el cas en que la tensió de línia es de 3300 V.

$$V_{eficaç fase} = \frac{3300}{\sqrt{3}} = 1905,26 \text{ V} \quad (3.3)$$

També per realitzar el càlcul de les components simètriques aquestes s'han de calcular en valor de línia per això per fer el canvi de tensió de fase a tensió de línia correctament s'ha d'utilitzar el diagrama vectorial de tensions de valors de línia i de fase que hi ha a la figura 3.1.

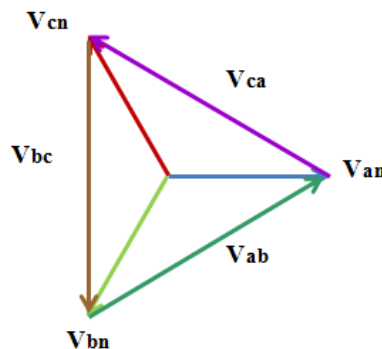


Figura 3.1. Diagrama vectorial de tensions

Les equacions 3.4, 3.5 i 3.6 són les equacions per obtenir les tensions de línia (ab, bc i ca), i estan extretes del diagrama vectorial de tensions de la figura 3.1.

$$\overline{V_{ab}} = \overline{V_{an}} - \overline{V_{bn}} \quad (3.4)$$

$$\overline{V_{bc}} = \overline{V_{bn}} - \overline{V_{cn}} \quad (3.5)$$

$$\overline{V_{ca}} = \overline{V_{cn}} - \overline{V_{an}} \quad (3.6)$$

Tot seguit es realitza un càlcul d'exemple per obtenir les tres tensions de línia. Per ser més fàcil d'entendre el càlcul i no hi hagi desequilibris, s'ha optat per realitzar l'exemple en el cas equilibrat.

Primer de tot tenim les tensions de fase de forma vectorial que són les següents, el mòdul del qual és el de l'equació 3.3.

$$\overline{V_{an}} = 1905,26 \angle 0^\circ V \quad (3.7)$$

$$\overline{V_{bn}} = 1905,26 \angle -120^\circ V \quad (3.8)$$

$$\overline{V_{cn}} = 1905,26 \angle 120^\circ V \quad (3.9)$$

Aquestes equacions en el full de càlcul presenten la sintaxi següent:

- (3300/ARREL(3))
- COMPLEJO((3300/ARREL(3))*COS(RADIANS(-120));(3300/ARREL(3))*SIN(RADIANS(-120)))
- COMPLEJO((3300/ARREL(3))*COS(RADIANS(120));(3300/ARREL(3))*SIN(RADIANS(120)))

Els càlculs següents estan realitzats per un sistema equilibrat. En aquest cas per obtenir el valor de línia, sols multiplicant per $\sqrt{3}$ ja estaria ben realitzat el càlcul. El problema es quan hi ha desequilibris en les fases i llavors els angles de les tensions són diferents i s'ha de realitzar una resta vectorial. El càlcul següent es realitza utilitzant les equacions 3.4, 3.5 i 3.6. Els valors obtinguts són els que apareixen tot seguit.

$$\overline{V_{ab}} = \frac{3300}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - \frac{3300}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ = 3300 \angle 30^\circ V \quad (3.10)$$

$$\overline{V_{bc}} = \frac{3300}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ - \frac{3300}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ = 3300 \angle -90^\circ V \quad (3.11)$$

$$\overline{V_{ca}} = \frac{3300}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ - \frac{3300}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 3300 \angle 150^\circ V \quad (3.12)$$

Les equacions anteriors en full de càlcul Excel presenten la sintaxis següent:

- IM.SUSTR(C5;F5)
- IM.SUSTR(F5;I5)
- IM.SUSTR(I5;C5)

Tipus	Van	Vbn	Vcn
0	1905,255888	- 952,62794416 2882-1650i	- 952,62794416 2882+1650i

Taula 3.1. Tensions de fase pel sistema trifàsic equilibrat

Tipus	Vab	Vbc	Vca
0	2857,8838324 8865+1650i	-3300i	- 2857,8838324 8865+1650i

Taula 3.2. Tensions de línia pel sistema trifàsic equilibrat

La taula 3.1 mostra els valors de fase obtinguts en forma complexa sent els valors en forma vectorial els de les equacions 3.7, 3.8 i 3.9. La taula 3.2 es mostra els valors de tensió de línia en forma complexa ja que en les equacions 3.10, 3.11 i 3.13 s'ha obtingut el valor de línia en forma vectorial. Els valors s'han obtingut mitjançant el programa de càlcul Microsoft Excel 2010.

	Tipus	Van	Vbn	Vcn
T3(0,5%) 0,98VaN	3	1867,150771	- 917,54265697 9363- 1589,2305i	- 925,55902112 9494+1603,11 525i

Taula 3.3. Tensions de fase per un sistema trifàsic desequilibrat

Tipus	Vab	Vbc	Vca
3	2784,6934275 3861+1589,23 05i	8,0163641501 3104- 3192,34575i	- 2792,7097916 8874+1603,11 525i

Taula 3.4. Tensions de línia per un sistema trifàsic desequilibrat

Per veure com afecta un desequilibri de tensió en les tensions de línia es realitzarà el mateix càlcul que anteriorment però en un sistema desequilibrat. La taula 3.3 mostra els valors de tensió obtinguts de fase i la taula 3.4 els valors de línia per al sistema desequilibrat escollit. El tipus de desequilibri escollit perquè es vegi millor, és un desequilibri amb caiguda de tensió a les tres fases. Els valors de les tensions de fase són els següents:

$$\overline{V_{an}} = \frac{3300}{\sqrt{3}} \cdot 0,98 \angle 0^\circ = 1867,15 \angle 0^\circ V \quad (3.13)$$

$$\overline{V_{bn}} = \frac{3300}{\sqrt{3}} \cdot 0,96317 \angle -120^\circ V = 1835,08 \angle -120^\circ V \quad (3.14)$$

$$\overline{V_{cn}} = \frac{(0,98 + 0,96317) \cdot \frac{3300}{\sqrt{3}}}{2} \angle 120^\circ V = 1851,12 \angle 120^\circ V \quad (3.15)$$

Aquestes equacions en el full de càlcul presenten la sintaxi següent:

- $(3300/\text{RAIZ}(3)) * 0,98$
- $\text{COMPLEJO}((3300/\text{RAIZ}(3)) * 0,96317 * \text{COS}(\text{RADIANS}(-120))); ((3300/\text{RAIZ}(3)) * 0,96317 * \text{SENO}(\text{RADIANS}(-120)))$
- $\text{COMPLEJO}((\text{C96} + \text{IM.ABS}(\text{F96}))/2) * \text{COS}(\text{RADIANS}(120)); ((\text{C96} + \text{IM.ABS}(\text{F96}))/2) * \text{SENO}(\text{RADIANS}(120)))$

Els valors obtinguts substituint a les equacions 3.4, 3.5 i 3.6 son els següents:

$$\begin{aligned} \overline{V_{ab}} &= \frac{3300}{\sqrt{3}} \cdot 0,98 \angle 0^\circ - \frac{3300}{\sqrt{3}} \cdot 0,96317 \angle -120^\circ \\ &= 3206,27 \angle 29,71^\circ V \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \overline{V_{bc}} &= \frac{3300}{\sqrt{3}} \cdot 0,96317 \angle -120^\circ - \frac{(0,98 + 0,96317) \cdot \frac{3300}{\sqrt{3}}}{2} \angle 120^\circ V \\ &= 3192,36 \angle -89,86^\circ \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \overline{V_{ca}} &= \frac{(0,98 + 0,96317) \cdot \frac{3300}{\sqrt{3}}}{2} \angle 120^\circ - \frac{3300}{\sqrt{3}} \cdot 0,98 \angle 0^\circ \\ &= 3220,13 \angle 150,14^\circ V \end{aligned} \quad (3.18)$$

Llavors els valors de les següents equacions en full de càlcul presenten la següent forma:

- $\text{IM.SUSTR}(\text{C96}; \text{F96})$
- $\text{IM.SUSTR}(\text{F96}; \text{I96})$
- $\text{IM.SUSTR}(\text{I96}; \text{C96})$

Es pot veure com en un sistema desequilibrat, en aquest exemple que és de caiguda de tensió, el mòdul de les tensions es veu afectat, sent aquest disminuït considerablement. I els angles de les tensions també es veuen afectats. Per això s'ha de realitzar el càlcul vectorial de les tensions ja que tant el mòdul com l'angle de les tensions de línia es veu molt afectat respecte el càlcul anterior realitzat en un sistema equilibrat.

3.1.2 Càlcul del valor mig de tensió

Per realitzar el càlcul del valor mig de les tensions s'utilitza l'equació 3.19. Consisteix en sumar el mòdul de les tensions de línia i dividir el valor entre tres.

$$V_{mig} = \frac{|\overline{V_{ab}}| + |\overline{V_{bc}}| + |\overline{V_{ca}}|}{3} \quad (3.19)$$

$$V_{mig} = \frac{3206,27 + 3192,36 + 3220,13}{3} = 3206,25 \text{ V} \quad (3.20)$$

El càlcul per aquest desequilibri en full de càlcul Excel és el següent:

- $(\text{IM.ABS(L96)} + \text{IM.ABS(N96)} + \text{IM.ABS(P96)}) / 3$

Es pot observar com el valor mig de la tensió en l'exemple escollit és inferior a la tensió de línia nominal de 3300 V. Amb una caiguda en la fase a del 2%, aquesta ja es redueix considerablement perquè també es produeix una caiguda de tensió en les altres dos fases.

	Tipus	Vmig
T3(0,5%) 0,98VaN	3	3.206

Taula 3.5. Valor mig de línia per un sistema trifàsic desequilibrat

3.1.3 Càlcul del desequilibri de tensió (VUF)

En aquest apartat es realitzarà un exemple de càlcul per obtenir el valor del desequilibri de tensió. El desequilibri de tensió que s'ha agafat com exemple és el mateix que en l'apartat anterior. Amb els valors de tensió de línia obtinguts en l'apartat anterior, es calculen les tensions per les components directa, inversa i homopolar, i finalment es calcula el valor de desequilibri.

Tipus	V0L	V1L	V2L	VUF(%)
3	4,5474735088 6463E-13	2776,6770633 8848+1603,11 525i	8,0163641501 2943- 13,88475i	0,5000%

Taula 3.6. Components simètriques i desequilibri de tensió per un sistema desequilibrat

Les tensions de línia obtingudes són les següents:

$$\overline{V_{ab}} = 3206,27 \angle 29,71^\circ \text{ V} \quad (3.21)$$

$$\overline{V_{bc}} = 3192,36 \angle -89,86^\circ \text{ V} \quad (3.22)$$

$$\overline{V_{ca}} = 3220,13 \angle 150,14^\circ \text{ V} \quad (3.23)$$

Gràcies a les equacions 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 i 2.5 es calculen les components simètriques.

$$\overline{V_{0L}} = \frac{1}{3}(3206,27 \angle 29,71^\circ + 3192,36 \angle -89,86^\circ + 3220,13 \angle 150,14^\circ) = 0 \angle 0^\circ V \quad (3.24)$$

$$\overline{V_{1L}} = \frac{1}{3} \left(3206,27 \angle 29,71^\circ + -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot 3192,36 \angle -89,86^\circ + -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot 3220,13 \angle 150,14^\circ \right) = 3206,23 \angle 30^\circ V \quad (3.25)$$

$$\overline{V_{2L}} = \frac{1}{3} \left(3206,27 \angle 29,71^\circ + -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot 3192,36 \angle -89,86^\circ + -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot 3220,13 \angle 150,14^\circ \right) = 16,03 \angle -60^\circ V \quad (3.26)$$

Aquestes equacions en el full de càlcul presenten la sintaxi següent:

- IM.DIV(IM.SUM(L96;N96;P96);3)
- IM.DIV(IM.SUM(L96;IM.PRODUCT(\$F\$3;N96);IM.PRODUCT(\$L\$3;P96));3)
- IM.DIV(IM.SUM(L96;IM.PRODUCT(\$L\$3;N96);IM.PRODUCT(\$F\$3;P96));3)

Els valors obtinguts són els següents:

$$\overline{V_{0L}} = 0 \angle 0^\circ V \quad (3.27)$$

$$\overline{V_{1L}} = 3206,23 \angle 30^\circ V \quad (3.28)$$

$$\overline{V_{2L}} = 16,03 \angle -60^\circ V \quad (3.29)$$

Finalment s'obté el desequilibri de tensió utilitzant les equacions 2.11 i 2.12.

$$VUF = \frac{16,03 \angle -60^\circ}{3206,23 \angle 30^\circ} = 5 \cdot 10^{-3} \angle -90^\circ \quad (3.30)$$

En full de càlcul Excel:

- IM.DIV(T96;S96)

$$\%VUF = \frac{16,03}{3206,23} \cdot 100 = 0,5 \% \quad (3.31)$$

En full de càlcul Excel:

- IM.ABS(U96)

3.1.4 Càlcul del desequilibri de corrent (CUF)

Utilitzant com valors inicials, els obtinguts anteriorment sobre la tensió de la component directa i inversa es calcula el desequilibri de corrent. Els valors inicials són obtinguts de les equacions 3.28 i 3.29 i els valors són els següents:

$$\overline{V_{1L}} = 3206,23 \angle 30^\circ V \quad (3.32)$$

$$\overline{V_{2L}} = 16,03 \angle -60^\circ V \quad (3.33)$$

Obtinguts els valors de línia, aquests són passats a tensions de fase per poder realitzar posteriorment el càlcul de la corrent de l'estator. L'equació utilitzada és la 3.34.

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (3.34)$$

$$V_{1F} = \frac{3206,23 \angle 30^\circ V}{\sqrt{3}} = 1851,12 \angle 30^\circ V \quad (3.35)$$

$$V_{2F} = \frac{16,03 \angle -60^\circ V}{\sqrt{3}} = 9,26 \angle -60^\circ V \quad (3.36)$$

Les equacions 3.35 i 3.36 en el full de càlcul presenten la sintaxi següent:

- `IM.DIV(S96;COMPLEJO(RAIZ(3);0))`
- `IM.DIV(IM.SUM(L96;IM.PRODUCT($L$3;N96);IM.PRODUCT($F$3;P96));3)`

Primer s'utilitza l'equació 2.27 per calcular l'impedància paral·lel de la component directa i de la component inversa, i una vegada obtingut aquest valor es substitueix a l'equació 2.26 per obtenir el resultat de la corrent de l'estator.

$$\overline{Z_{p1}} = \frac{522,855 j \cdot (\frac{3,447}{0,03} + 12,0637 j)}{\frac{3,447}{0,03} + (522,855 + 12,0637)j} = 110,41 \angle 18,12^\circ \quad (3.37)$$

$$\overline{Z_{p2}} = \frac{522,855 j \cdot (\frac{3,447}{1,97} + 12,0637 j)}{\frac{3,447}{1,97} + (522,855 + 12,0637)j} = 11,91 \angle 81,93^\circ \quad (3.38)$$

En full de càlcul Excel la sintaxis és la següent:

- `IM.DIV(IM.PRODUCT($S$3;COMPLEJO($I$2/AX96;$R$2));COMPLEJO($I$2/AX96;$S$2+$R$2))`
- `IM.DIV(IM.PRODUCT($S$3;COMPLEJO($I$2/AY96;$R$2));COMPLEJO($I$2/AY96;$S$2+$R$2))`

$$|\overline{I_{s1}}| = \frac{1851,12 \angle 30^\circ V}{4,734 + 12,0637 j + \overline{Z_{p2}}} = 15,55 A \quad (3.39)$$

$$|\overline{I_{s2}}| = \frac{9,26 \angle -60^\circ V}{4,734 + 12,0637 j + \overline{Z_{p2}}} = 0,37 A \quad (3.40)$$

Aquestes equacions en el full de càlcul presenten la sintaxi següent:

- AA96/IM.ABS (IM.SUM (COMPLEJO (\$C\$2; \$P\$2) ; AN96))
- AB96/IM.ABS (IM.SUM (COMPLEJO (\$C\$2; \$P\$2) ; AO96))

Els valors obtinguts de la corrent de l'estator s'obtenen en mòdul.

Tipus	Zp1	Zp2
3	104,93437317 4887+34,3314 360603349i	1,6716962364 8312+11,7971 180440274i

Taula 3.7. Impedància paral·lel

Tipus	Is1	Is2	CUF(%)
3	15,55	0,37	2,41%

Taula 3.8. Corrents directa i inversa de l'estator per un sistema desequilibrat

Per calcular el desequilibri de corrent s'utilitza l'equació 2.13, on les corrents són les corrents de l'estator del motor d'inducció trifàsic.

$$CUF = \frac{0,37}{15,55} = 2,41 \% \quad (3.41)$$

Aquesta equació en el full de càlcul presenta la sintaxi següent:

- AR96/AQ96

3.1.5 Càlcul del desequilibri del parell (TUF)

Per calcular el desequilibri del parell primer es calcula la tensió de Thevenin del circuit equivalent de la figura 2.13. L'equació per obtenir la tensió de Thevenin és l'equació 2.21. En la taula 3.9 es mostren les tensions de Thevenin per la component directa i per la component inversa. Per obtenir les tensions de Thevenin de la component directa i inversa en l'equació 2.21 primer s'haurà de substituir per la tensió V_{1F} i després per V_{2F} respectivament. On V_{1F} i V_{2F} són:

$$V_{1F} = 1851,12 \angle 30^\circ V \quad (3.42)$$

$$V_{2F} = 9,26 \angle -60^\circ V \quad (3.43)$$

Tipus	Vth1	Vth2
3	1558,8326265 5851+918,481 000986191i	4,5928564205 7282- 7,7949292688 7051i

Taula 3.9. Tensió directa i inversa de Thevenin

$$\overline{V_{th1}} = \frac{522,855j}{4,734 + (12,0637 + 522,855)j} \cdot 1851,12 \angle 30^\circ = 1809,30 \angle 30,51^\circ \quad (3.44)$$

$$\overline{V_{th2}} = \frac{522,855j}{4,734 + (12,0637 + 522,855)j} \cdot 9,26 \angle -60^\circ V = 9,05 \angle -59,49^\circ \quad (3.45)$$

Aquestes equacions en el full de càlcul presenten la sintaxi següent:

- IM.PRODUCT (IM.DIV (\$S\$3; COMPLEJO (\$C\$2; (\$P\$2+\$S\$2))) ; X96)
- IM.PRODUCT (IM.DIV (\$S\$3; COMPLEJO (\$C\$2; (\$P\$2+\$S\$2))) ; Y96)

Zth	Rth	Xth
4,5225272743 5254+11,8316 739312617i	4,522527274	11,83167393

Taula 3.10. Impedància equivalent de Thevenin

Per aconseguir la corrent del rotor també s'ha de calcular la impedància de Thevenin mitjançant l'equació 2.22. En la taula 3.10 apareix el resultat del càlcul d'aquesta impedància.

$$\overline{Z_{th}} = \frac{(4,734 + 12,0637j) \cdot 522,855j}{4,734 + (12,0637 + 522,855)j} = 12,67 \angle 69,08 = 4,52 + 11,83j \quad (3.46)$$

En full de càlcul Excel la sintaxis és la següent:

- IM.DIV (IM.PRODUCT (IM.SUM (C2; P3) ; S3) ; IM.SUM (C2; P3; S3))

Una vegada obtinguda la impedància de Thevenin s'ha d'obtenir la component real i imaginària d'aquesta impedància per després poder substituir a l'equació 2.23 tots els valors obtinguts.

$$\overline{R_{th}} = \text{Part Real } \overline{Z_{th}} = 4,52 \Omega \quad (3.47)$$

$$\overline{X_{th}} = \text{Part Imaginara } \overline{Z_{th}} = 11,83 \Omega \quad (3.48)$$

Tipus	Ir1	Ir2	CUFrator(%)
3	14,86	0,37	2,47%

Taula 3.11. Valors de corrent del rotor per la component directa i inversa.

Ja obtinguts els resultats anteriors ara es hora de calcular la corrent del rotor substituint els resultats anteriors a l'equació 2.23.

$$I_{r1} = \frac{V_{th1}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s_1}\right)^2 + (X_{th} + X_r)^2}} = \frac{1809,30}{\sqrt{\left(4,52 + \frac{3,447}{0,03}\right)^2 + (11,83 + 12,0637)^2}} = 14,86A \quad (3.49)$$

$$I_{r2} = \frac{V_{th2}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s_2}\right)^2 + (X_{th} + X_r)^2}} = \frac{9,05}{\sqrt{\left(4,52 + \frac{3,447}{1,97}\right)^2 + (11,83 + 12,0637)^2}} = 0,37A \quad (3.50)$$

Aquestes equacions en el full de càlcul presenten la sintaxi següent:

- IM.ABS (AD96) /RAIZ ((\$AE\$2+(\$I\$2/AX96)) ^2+ (\$AF\$2+\$R\$2) ^2)
- IM.ABS (AE96) /RAIZ ((\$AE\$2+(\$I\$2/AY96)) ^2+ (\$AF\$2+\$R\$2) ^2)

Una vegada obtingudes les corrents de l'estator es pot calcular el parell per la component directa i inversa gràcies a l'equació 2.24. En la taula 3.11 apareixen els valors del parell per la component directa i inversa calculats amb l'equació 2.24.

Tipus	T1	T2	T	TUF(%)
3	484,31	0,00	484,31	0,001%

Taula 3.11. Valors del parell per la component directa i inversa i del desequilibri de parell.

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{3 \cdot R_r}{\omega_1 \cdot s_1} \cdot \frac{V_{th1}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s_1}\right)^2 + (X_{th} + X_r)^2} \\ &= \frac{3 \cdot 3,447}{50\pi \cdot 0,03} \cdot \frac{1809,30^2}{\sqrt{\left(4,52 + \frac{3,447}{0,03}\right)^2 + (11,83 + 12,0637)^2}} \\ &= 484,31 Nm \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned}
 T_2 &= \frac{3 \cdot R_r}{\omega_2 \cdot s_2} \cdot \frac{V_{th2}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s_2}\right)^2 + (X_{th} + X_r)^2} \\
 &= \frac{3 \cdot 3,447}{50\pi \cdot 1,97} \cdot \frac{9,05^2}{\sqrt{\left(4,52 + \frac{3,447}{1,97}\right)^2 + (11,83 + 12,0637)^2}} \\
 &= 0,00 \text{ Nm} \quad (3.52)
 \end{aligned}$$

Les equacions 3.51 i 3.52 en el full de càlcul presenten la sintaxi següent:

- $((3 * \$I\$2) / ((PI() * 50) * AX96)) * AG96^2$
- $((3 * \$I\$2) / ((PI() * 50) * AY96)) * AH96^2$

Per calcular el desequilibri del parell s'utilitza l'equació 2.14. El valor obtingut és el següent:

$$TUF = \frac{0,00}{484,31} = 0,001 \% \quad (3.53)$$

En full de càlcul Excel la sintaxis és la següent:

- ABS(AK96/AJ96)