

| |
|--|
| <p>ACCIONAMENT DE LA MÀQUINA DE CC EN ELS QUATRE QUADRANTS AMB UN DOBLE PONT DE TIRISTORS TRIFÀSIC</p> <p>REGULACIÓ EN CASCADA DE LA VELOCITAT DEL MOTOR DE CC</p> |
|--|

OBSERVACIONS

Aquesta pràctica es realitzarà a mode de demostració, per això en aquest redactat en general no s'expliquen en profunditat tot els procediments, perquè aquests seran explicats en detall pel professor durant el desenvolupament de la pràctica.

La pràctica s'ha dividit en tres parts:

- 1a. part: Anàlisi del funcionament d'un pont de tiristors totalment controlat alimentant una càrrega resistiva.
- 2a. part: Accionament de la màquina de cc en els quatre quadrants amb un doble pont de tiristors.
- 3a. part: Regulació en cascada de la velocitat del motor de cc

ELEMENTS DE LA PLATAFORMA DIDÀCTICA

Els exercicis proposats se suporten amb una plataforma didàctica dissenyada especialment per aquesta pràctica a la que s'hi afegeixen altres elements.

La plataforma didàctica és un conjunt format per una sèrie d'elements que s'interconnecten entre ells. Els principals elements són:

- Un doble pont de tiristors totalment controlat connectat a una xarxa elèctrica trifàsica de 230 Volts de tensió de línia. Aquest pont es descriurà en el següent apartat.
- Una plataforma CompactRIO de National Instruments amb mòduls d'entrada i sortida digitals i analògics pel control dels diferents elements i per la visualització dels senyals analògics d'interès.
- Motor de corrent continu Vascotipus VD 100M amb les següents dades nominals

Potència: 3,7 KW.

Intensitat excitació: 0,4 A.

Velocitat: 2700 rpm.

Rendiment: 79,6 %

Tensió d'induït: 310 V.

Parell: 13 Nm.

Tensió d'excitació: 195 V.

La : 21 mH.

Intensitat induït: 15 A

Ra : 2,35 Ohms (a 115° C)

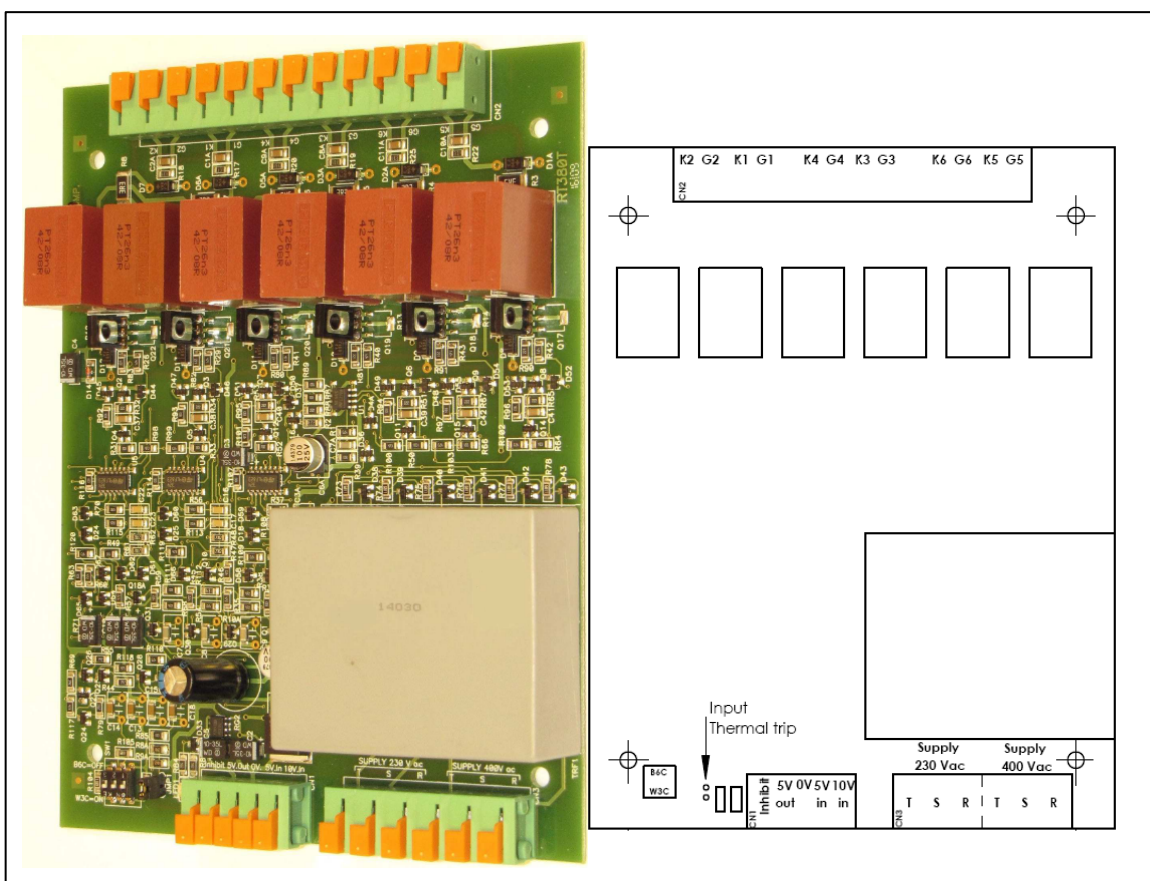
- Aquest motor té acoblada una dinamo tacomètrica estàndard (sortida 60 Volts per 1000 rpm).
- Un motor Mavilor Brushless BLS-114 amb mòdul digital de control SMT.BD1/1a/220/30. Aquesta màquina elèctrica acoblada per l'eix al motor de corrent continu fa la funció de fre o màquina motriu segons correspongui. El parell nominal d'aquest motor és de 10,6 Nm.
- Conjunt d'elements pel condicionament dels senyals mesurats i elements interfície entre els diferents components del sistema.
- Un PC.

La programació del sistema de control, adquisició i visualització de dades s'ha fet amb LabVIEW, en el propi sistema CompactRIO s'ha implementat amb la tecnologia FPGA l'estructura de control amb els dos PID's que conformen la regulació en cascada. En el PC hi ha implementat tot el sistema d'interfície gràfica amb l'usuari.

BREU DESCRIPCIÓ DE L'EQUIP DE TIRISTORS

L'equip de tiristors que s'utilitza és un doble pont de tiristors trifàsic. Els polsos de disparament dels tiristors els generen dos mòduls RT380T 230/400 PCN RoHS de Semikron, un per a cada pont. La figura mostra un d'aquests mòduls, els connectors de la part inferior corresponen a les entrades d'alterna per la alimentació del mòdul i la generació del sincronisme i les corresponents entrades de senyals de control analògiques i dels senyals digital d'inhibició. Els connectors de la part superior corresponen als polsos de disparament dels 6 tiristors.

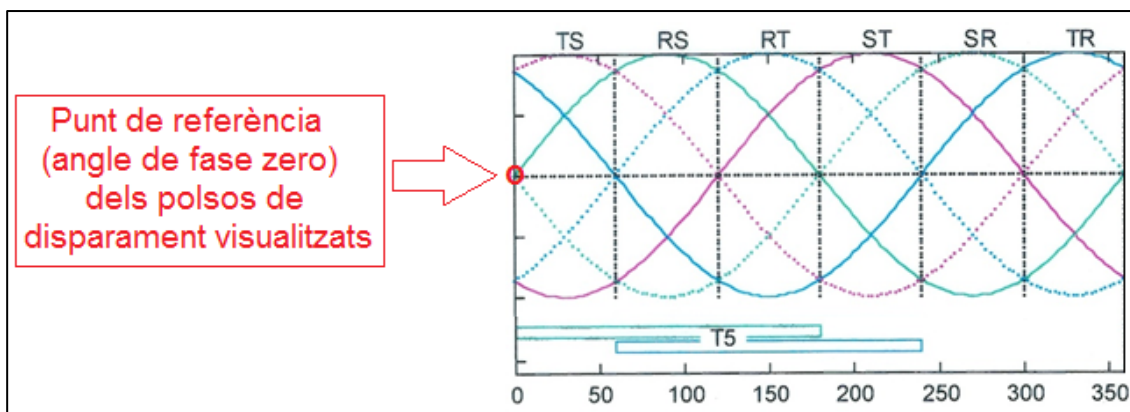
Cal esmentar que en la posta en marxa de l'equip i quant el senyal d'inhibició passa a zero s'estableix un retard de 1 segon abans de que les sortides de polsos de disparament dels tiristors siguin operatives. La situació de mòdul inhibït queda assenyalada en el mòdul amb un led vermell.



Els dos mòduls d'aquest equip queden inhibits si la intensitat del debrat d'excitació de la màquina de cc és zero.

Per facilitar la visualització de senyals tenim dos punts de mesura:

- Punt per a la visualització dels polsos de disparament dels tiristors generats en el mòdul del pont A i sincronitzats respecte al flanc de pujada de la tensió RS. Aquest punt de visualització i la corresponent GND està aïllada del mòdul de control mitjançant un optoacoblador.
- Punt per a la visualització dels polsos a la porta del tiristor T5 del pont A



1a. PART: ANÀLISI DEL FUNCIONAMENT D'UN PONT DE TIRISTORS TOTALMENT CONTROLAT ALIMENTANT UNA CÀRREGA RESISTIVA

La verificació del correcte funcionament d'un equip de tiristors i/o la seva reparació, és millor fer-la alimentant una càrrega purament resistiva que consumeixi una intensitat per sobre del valor d'intensitat de manteniment dels tiristors. Les formes d'ona de la tensió sobre la càrrega resistiva es poden analitzar més fàcilment que si estiguéssim alimentant un motor de cc.

Per altra banda per analitzar el funcionament de l'equip en diferents situacions és interessant poder mesurar amb l'oscil·loscopi l'angle de disparament. En aquesta part de la pràctica explicarem com fer-ho.

RELACIÓ D'EQUIPS

- Plataforma didàctica
- Oscil·loscopi digital
- El grup de bombetes com a càrrega resistiva

PREPARACIÓ:

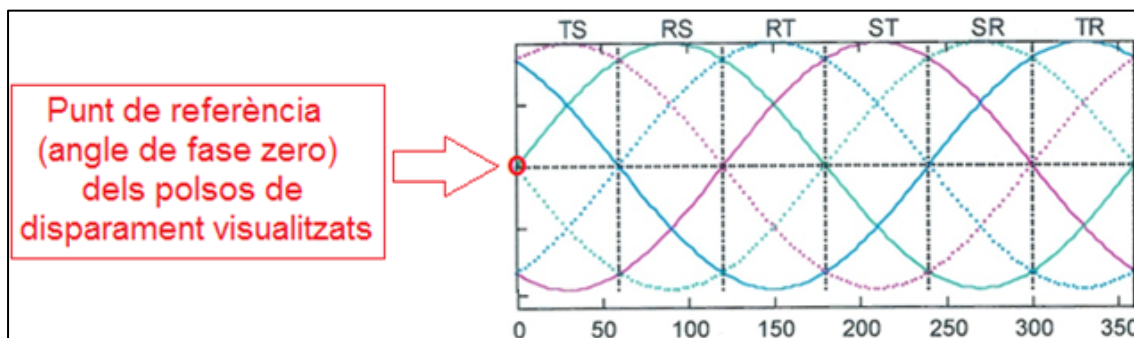
- Interconnectar tots els elements de la plataforma didàctica a excepció de:
 - Els connectors de senyals pel grup de tiristors (DB9 i el tripolar circular).
 - L'alimentació de l'induït del motor de cc

L'equip de tiristors en aquesta primera part es controla manualment i per tant no cal activar l'alimentació de la resta d'elements de la plataforma didàctica. Tampoc intervé ni el CompactRIO ni el PC.

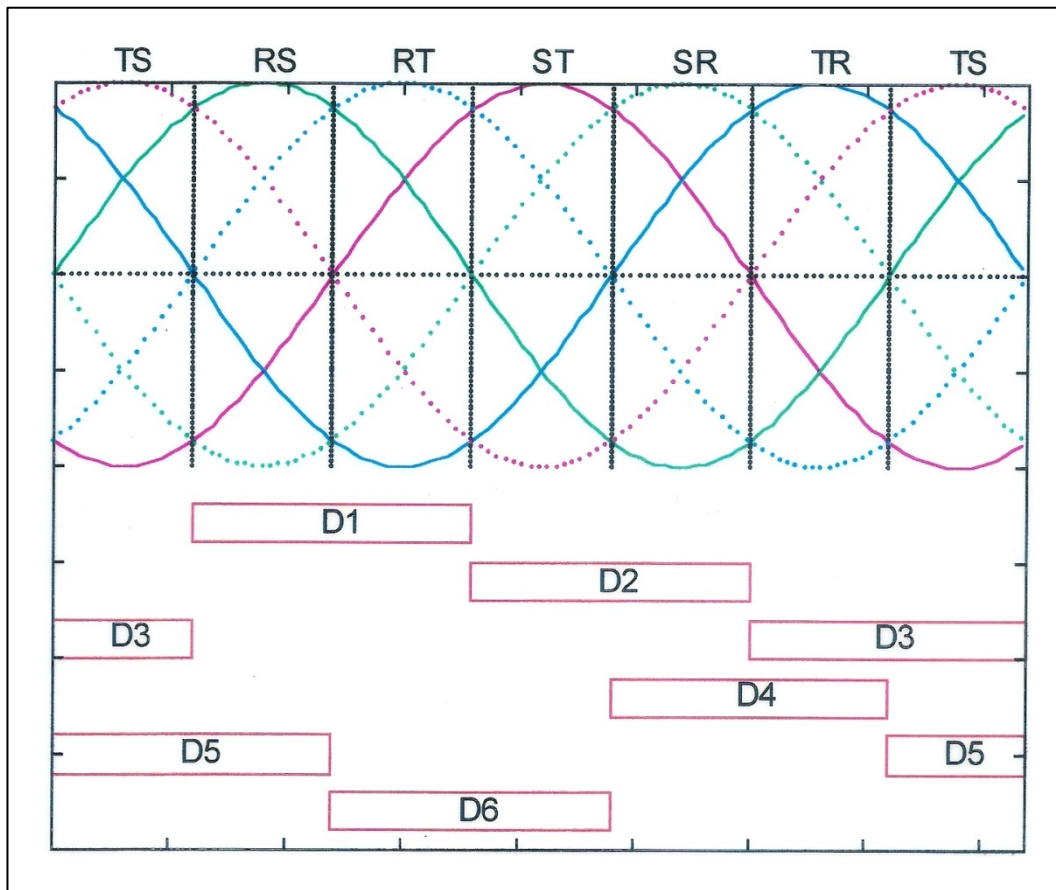
- L'equip de tiristors s'ha de controlar manualment, per tant s'ha de connectar el connector sense cables en la caixa de connexió de senyals de control del grup de tiristors.
- Connectar a la sortida del doble pont de tiristors el grup de bombetes.
- Preparar l'oscil·loscopi aïllat del terra per a la visualització de la tensió de sortida i per a la mesura de l'angle de fase.

EXERCICIS:

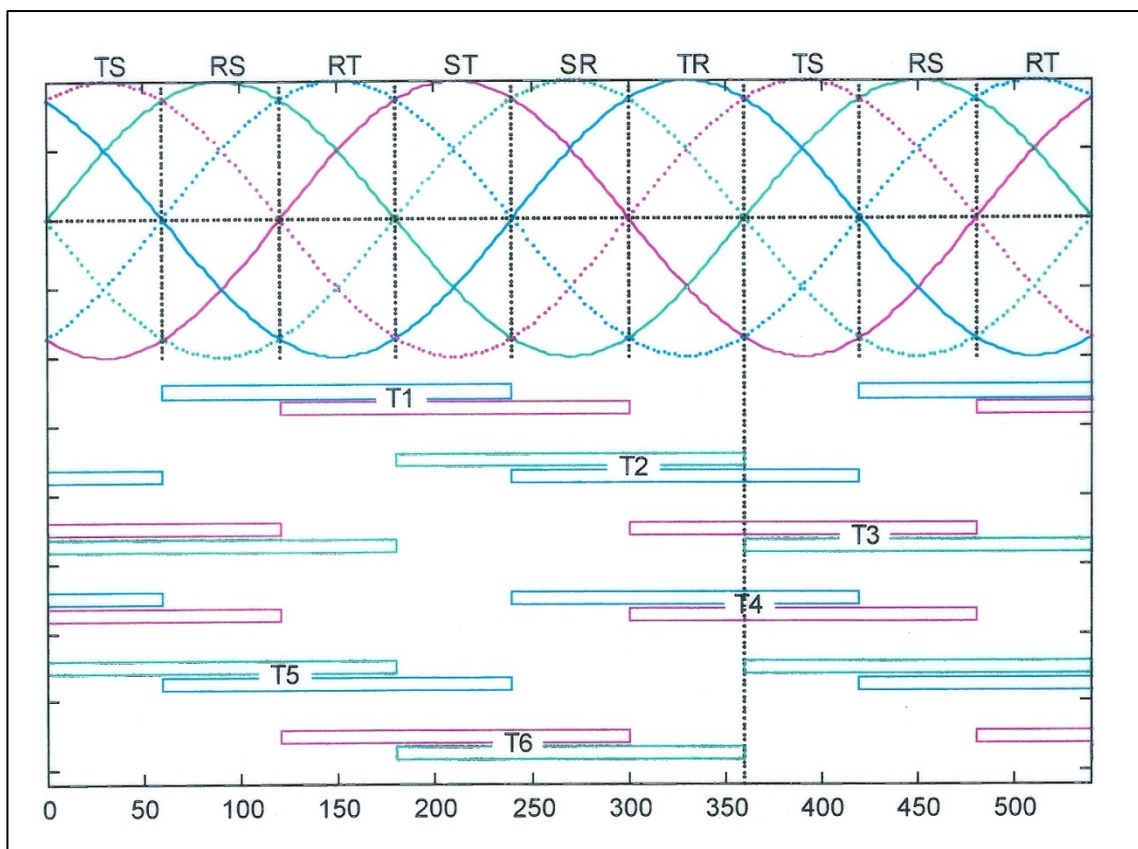
Tenint en compte l'assenyalat en la figura:



- Mesurar l'angle de fase del pols de disparament dels tiristors en el moment just d'entrada en conducció dels tiristors. Contrastar amb el valor teòric.
- Visualitzar les formes d'ona per diferents angles de disparament.
- Per un angle de disparament igual a zero relacionar les formes d'ona visualitzades a l'oscil·loscopi amb la conducció de cada tiristor segons la figura:



- Visualitzar el senyal en la porta del tiristor T5. Relacionar el senyal visualitzat amb la figura:



2a. PART: ACCIONAMENT DE LA MÀQUINA DE CC EN ELS QUATRE QUADRANTS AMB UN DOBLE PONT DE TIRISTORS TRIFÀSIC

RELACIÓ D'EQUIPS I PROGRAMA LABVIEW

- Plataforma didàctica
- Oscil·loscopi digital
- Voltímetre
- Amperímetre
- Wattímetre
- Programa LabVIEW (projecte/vi): Projecte_RT / Manual 4Q.vi

PREPARACIÓ:

- Connectar a la sortida del doble pont de tiristors el connector del debanat d'induït o armadura del motor de cc.
- Connectar el Wattímetre trifàsic per a mesurar la potència activa consumida o lliurada a la xarxa per l'equip de tiristors.
- Connectar el voltímetre per a la mesura de la tensió de sortida de l'equip de tiristors (tensió d'induït).
- Connectar l'amperímetre per a la mesura de la intensitat d'induït.
- Connectar el connectors de senyals pel control del grup de tiristors.
- Activar l'alimentació dels elements de la plataforma didàctica, executar el corresponent programa de LabVIEW.
-

EXERCICIS EN EL PRIMER QUADRANT:

- Mesurar l'angle de fase dels pols de disparament en el moment just en que el motor comença a rodar. Contrastar amb el valor teòric.
- Visualitzar les formes d'ona de la tensió d'induït per diferents angles de disparament. Es recomana que el motor estigui frenat però sense superar la intensitat nominal.
- En buit o amb poca càrrega mecànica, visualitzar la forma d'ona de la tensió d'induït en conducció discontinua

- Anotar la polaritat (positiva o negativa) de la mesura del Wattímetre.
- Anotar la polaritat (positiva o negativa) de la mesura de la tensió d'induït
- Anotar el sentit de gir (positiu o negatiu).
- Omplir la primera fila de la següent taula, les files restants s'ompliran a mesura que es vagin analitzant els diferents quadrants

| Quadrant | Pont A/B | Tensió d'induït +/- | Intensitat (o parell) +/- | Velocitat +/- | Watts +/- | Màquina Motor/ Generador | G. tiristors Rectificador/ inversor |
|----------|----------|---------------------|---------------------------|---------------|-----------|--------------------------|-------------------------------------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |

EXERCICIS EN EL QUART QUADRANT:

- Mesurar l'angle de fase del pols de disparament al mateix moment que s'observa l'acció de frenat. Contrastar amb els valors teòrics.
- Visualitzar les formes d'ona de la tensió d'induït per diferents angles de disparament.
- Anotar la polaritat (positiva o negativa) de la mesura del Wattímetre.
- Anotar la polaritat (positiva o negativa) de la mesura de la tensió d'induït
- Anotar el sentit de gir (positiu o negatiu).
- Omplir la quarta fila de la taula.

EXERCICIS EN EL TERCER I SEGON QUADRANT

- Analitzar el comportament en cada un d'aquest dos quadrants i acabar d'omplir la taula.

RELACIÓ D'EQUIPS I PROGRAMA LABVIEW

- Plataforma didàctica
- Tacòmetre portàtil.
- Amperímetre
- Programa LabView (projecte/vi): projecte_FPGA / Host PC.vi

DADES PELS AJUSTAMENTS DE LA REGULACIÓ

Revisem una sèrie de dades que poden ser útils per càlculs i ajustaments relacionats amb la regulació:

- Dades del doble pont de tiristors

Connectat a una xarxa elèctrica de 230 Volts de tensió de línia.

Cal recordar que amb una càrrega fortament inductiva assumint un corrent a la càrrega continu i constant, la tensió mitjana a la càrrega respon a l'expressió:

$$V_{\text{mitjana}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{\text{ef}} \cdot \cos \alpha = 1,35 \cos \alpha$$

- Dades nominals del motor de cc:

Velocitat: 2700 rpm.

Tensió d'induït: 310 Volts.

Intensitat d'induït: 15 Ampers.

Parell nominal: 13 Nm

Ra : 2,35 Ohms (a 115° C)

- Parell nominal del motor brushless:

El motor brushless que fa la funció de fre emulant la càrrega mecànica té un parell nominal de 10,6 Nm.

- Especificacions de la regulació que s'ha d'implementar:

Velocitat màxima: 2700 rpm

Parell màxim: 13 Nm.

Característiques de la càrrega mecànica: la plataforma didàctica permet emular càrregues de parell constant i càrregues amb una característica parell-velocitat lineal amb un parell a 2700 rpm de 13 Nm.

Volem emular una regulació de velocitat analògica en que el valor analògic de consigna va de 0 a 10 Volts per velocitats positives, i de 0 a -10 Volts per velocitats negatives.

Senyal analògica de mesura d'intensitat a la sortida del mòdul de mesura i adaptació de senyal: 10 Volts per 15 Ampers

Senyal analògica de mesura de velocitat a la sortida del mòdul d'aïllament galvànic: 10 volts per 2700 rpm.

VERIFICAR QUE AMB UNA CÀRREGA DE CARACTERÍSTICA PARELL-VELOCITAT LINEAL (13 Nm a 2700 rpm) PODEM ASSOLIR LES 2700 rpm

Amb les dades disponibles comprovar realitzant el corresponent càlcul que regulant exclusivament per l'induït, sense debilitament de flux, podem assolir la velocitat màxima exigida de 2700 rpm.

FASES I ESTRUCTURES A UTILITZAR

| Fase | Estructura |
|---|-------------------------------------|
| Ajustament del guany de la mesura de velocitat | Llaç obert |
| Ajustament del guany de la mesura d'intensitat | Llaç obert |
| Ajustament del limitador de consigna d'intensitat | Llaç d'intensitat (sense excitació) |
| Ajustament del regulador d'intensitat | Llaç d'intensitat (sense excitació) |
| Proves de la regulació d'intensitat | Llaç d'intensitat (sense excitació) |
| Ajustament del regulador de velocitat | Regulació en cascada |
| Proves de la regulació de velocitat | Regulació en cascada |

AJUSTAMENT DEL GUANY DE LA MESURA DE VELOCITAT

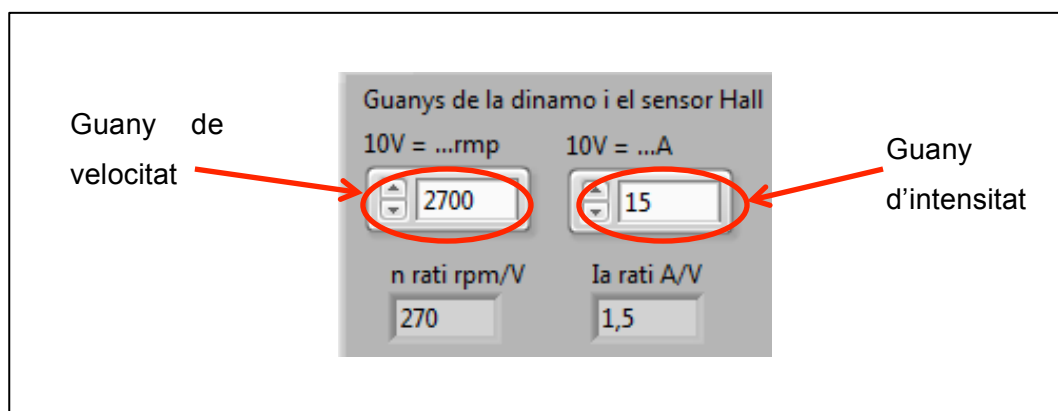
Aquesta fase compren dos passos:

- Ajust del "hardware": Verificar que per 2700 rpm tenim 10 Volts a la sortida del mòdul d'aïllament galvànic.
- Ajust del "software": en la pestanya "Control" entrar el valor d'ajust.

AJUSTAMENT DEL GUANY DE LA MESURA D'INTENSITAT

Aquesta fase compren dos passos:

- Ajust del "hardware": Verificar que per 15 A tenim 10 Volts a la sortida del mòdul de mesura i adaptació de senyal.
- Ajust del "software": en la pestanya "Control" entrar el valor d'ajust.



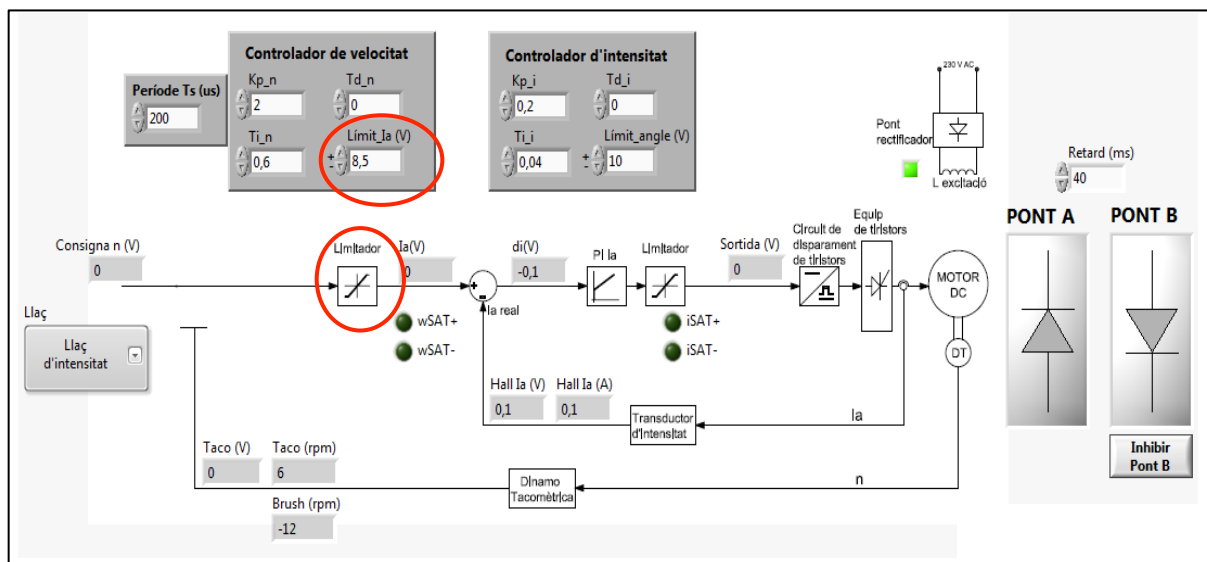
AJUSTAMENT DEL LIMITADOR DE CONSIGNA D'INTENSITAT

Aquest ajustament es realitza amb l'estructura "Llaç d'intensitat". És molt important realitzar aquest ajustament abans de procedir a l'ajustament del regulador d'intensitat

Per no sobrepassar el valor de parell nominal del fre [motor brushless: 10,6 Nm (aproximadament 11 Nm)] s'ajustarà el limitador de consigna d'intensitat perquè el parell del motor de cc no superi aquests 11 Nm.

En els equips industrials és habitual ajustar-lo a dues vegades la intensitat nominal. Aquest ajust que fem nosaltres “més conservador” es fa per evitar que actuï la protecció de sobreintensitat del driver del motor brushless de fre i també té l'avantatge de poder observar millor l'actuació d'aquest limitador en els diferents exercicis.

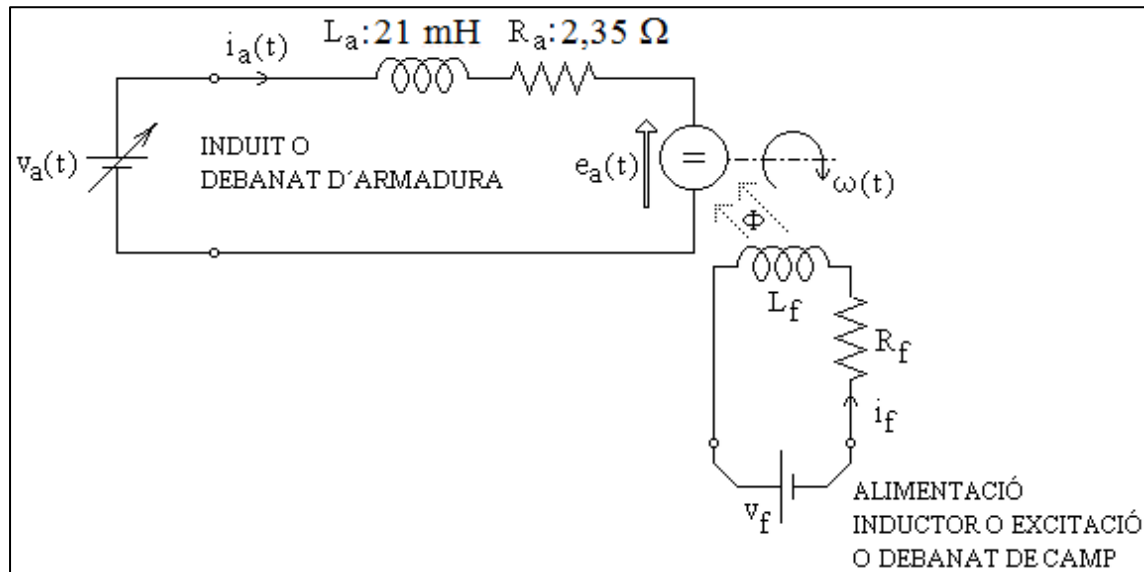
Coneixent les dades nominals del motor de cc i sabent que s'ha fet un ajustament perquè un valor de 10 Volts del senyal analògic de mesura d'intensitat d'induït correspongui a la intensitat nominal de 15 Ampers, calcula a quin valor límit de senyal analògic de consigna d'intensitat hem d'ajustar el limitador perquè limiti el parell que podrà proporcionar el motor de cc a 11 Nm. Introdueix el valor calculat.



AJUSTAMENT DEL REGULADOR D'INTENSITAT

Perquè es realitza aquest ajustament sense excitació i que implica això:

L'esquema equivalent del motor de cc en règim transitori és:



La resposta dinàmica del sistema en relació a com evoluciona el corrent d'induït o d'armadura $i_a(t)$ al variar la tensió d'induït aplicada $v_a(t)$ depèn exclusivament de la constant de temps elèctrica $T_e = \frac{L_a}{R_a}$ i per tant depèn exclusivament dels valors de L_a i R_a . Per

aquest motiu l'ajustament o sintonització del llaç intern d'intensitat sigui en els moderns equips digitals en que normalment es realitza per "autotuning" o en els antics equips analògics es realitza **sense alimentació del debanat d'excitació**.

Esquema equivalent del motor de cc en règim transitori sense alimentació del debanat d'excitació:

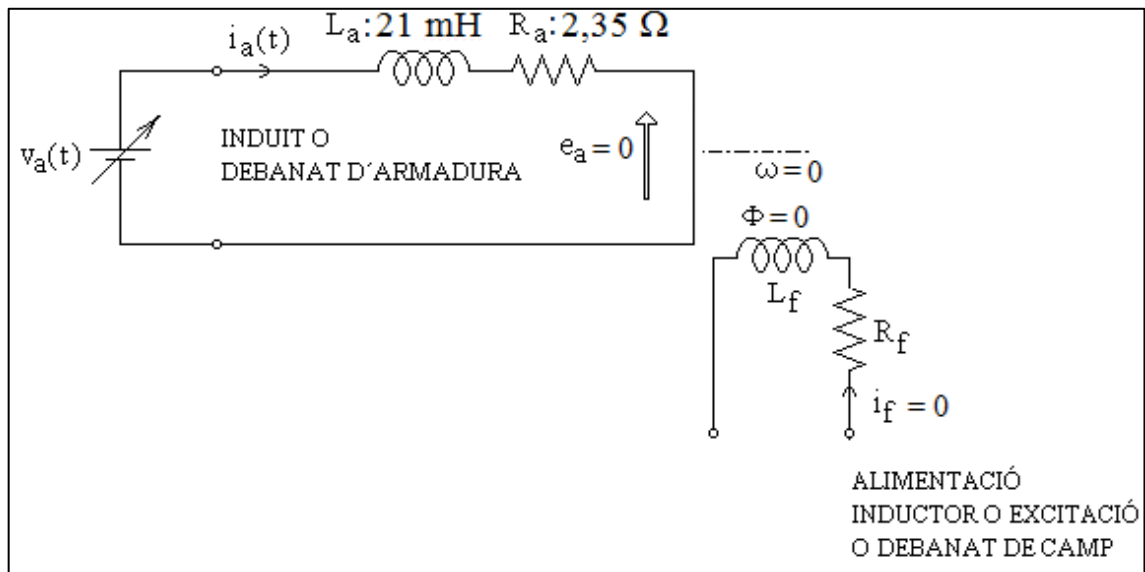


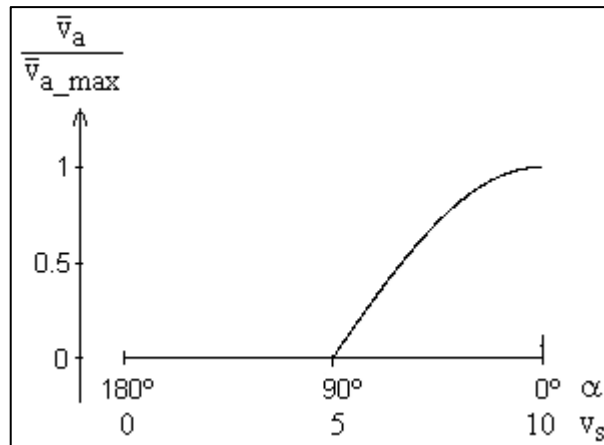
Figura 1. Esquema equivalent motor corrent continu sense excitació

Així, sense alimentació del debanat d'excitació, s'assoleix la intensitat nominal del debanat d'induït o d'armadura amb una tensió d'induït molt baixa.

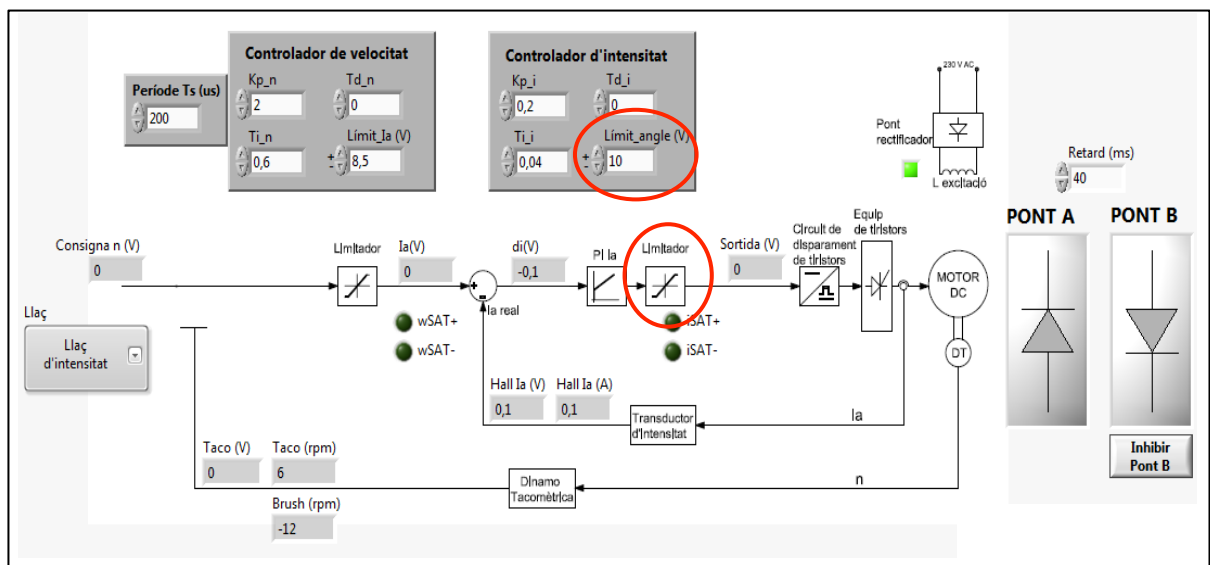
En l'estructura "Llaç d'intensitat" atès que treballem sense excitació, per seguretat limitarem la tensió de sortida del regulador d'intensitat per tal de limitar la tensió d'induït v_a i no superar la intensitat nominal de 15 Amperes.

Es proposa que calculeu quina tensió de sortida màxima del regulador d'intensitat dins l'interval de 0 a 10 Volts (tensió de control de l'equip de tiristors) cal ajustar per aconseguir aquest propòsit.

Cal recordar que amb una càrrega fortament inductiva assumint un corrent a la càrrega continu i constant, la tensió mitjana a la càrrega en funció de l'angle de disparament i en funció de la tensió de control respon a la següent gràfica ($V_{mitjana} = 1,35 \cos \alpha$).



Verifica que l'ajust de la limitació de sortida del regulador d'intensitat s'adequa al valor calculat.



Mètode empíric d'ajustament: "ajustament per prova i error"

El mètode d'ajustament que utilitzarem es basa en la següent explicació:

Para realizar la sintonía experimentalmente por prueba y error se sigue un procedimiento similar al siguiente:

1. Se pone el controlador en manual y se eliminan las acciones integral y derivativa
2. Fijar la ganancia proporcional a un valor pequeño
3. Poner el controlador en automático
4. Realizar un pequeño cambio en la consigna o en la carga y seguir la respuesta de la variable controlada hasta que se alcance una respuesta estacionaria. Al ser la ganancia tan baja, la respuesta debe ser lenta
5. Doblar doblar la ganancia y realizar un nuevo cambio en la consigna o en la carga
6. Repetir el paso 5 hasta que la respuesta sea muy subamortiguada y oscilatoria. Esta es la ganancia última
7. Fijar la ganancia proporcional a la mitad de la ganancia última
8. Iniciar una acción integral reduciendo el valor del tiempo integral T_i a su mitad. Realizar pequeñas perturbaciones o cambios en la consigna y observar el efecto
9. Encontrar el valor de T_i que hace que la dinámica del sistema sea muy subamortiguada y fijar T_i al doble de ese valor
10. Aumentar el valor del tiempo derivativo T_d y realizar cambios en la consigna o en la carga. Encontrar el valor de T_d que proporciona la mayor acción de control sin amplificar el ruido en el proceso de medida de la señal
11. Aumentar el valor de la ganancia proporcional en pasos de un 10% hasta que se cumplan las especificaciones deseadas

Es importante decir que este método funciona para casi todos los lazos de control pero no funciona con aquellos sistemas que son inestables para ganancias elevadas y para ganancias bajas, es decir, aquellos que solo sean estables para valores de ganancia proporcional intermedios.

Font: Apunts de l'assignatura Control de processos, Grau en Ciència i Tecnologia dels aliments. Universitat de Lleida. Autor: Javier Arántegui

Nosaltres aplicarem més o menys aquest mètode per ajustar el PI d'intensitat. Concretament:

Ajustaments inicials del PI:

- Guany: 1
- Temps integral: un temps molt alt de manera que quedi eliminada l'acció integral.

Guany proporcional:

Posar consigna d'intensitat, s'observa en la gràfica de l'evolució de la intensitat d'induït que amb un guany proporcional igual a 1 el senyal oscil·la. Anar baixant el guany proporcional en intervals de 0,1 fins a observar que el senyal deixi d'oscil·lar. Reduir a la meitat el valor del guany en que el senyal ha deixat d'oscil·lar i deixar aquest valor com a valor definitiu de guany.

Temps integral:

Partint d'un temps integral T_i igual a 0,1 observar que el senyal d'intensitat d'induït no oscil·la. Anar baixant en intervals de 0,02 fins a observar oscil·lació. Multiplicar per dos aquest últim valor i deixar-lo com a valor definitiu de temps integral.

PROVES DE LA REGULACIÓ D'INTENSITAT. EXERCICIS

- Una vegada realitzada la sintonització del PI d'intensitat es pot observar el comportament de la regulació aplicant rampes de consigna.
- També posant valors de consigna elevats es pot observar l'actuació del limitador de consigna d'intensitat

AJUSTAMENT DEL REGULADOR DE VELOCITAT

El limitador de consigna d'intensitat el podem deixar tal com ha quedar ajustat anteriorment. El limitador del senyal de sortida del PI d'intensitat el deixem sense acció limitadora, o sigui a 10 Volts.

També podem ajustar el regulador PI de velocitat per mètodes de tanteig. A mode d'orientació hem adjuntar unes instruccions corresponents a reguladors comercials, concretament els equips digitals de la sèrie 590 de Parker:

Speed Loop Adjustment

You will need to adjust the Speed Loop for your particular application although in most cases the default settings are acceptable. The optimum Speed Loop performance is achieved by adjusting the PROP. GAIN and INT. TIME CONST. parameters.

A PI controller is used to control the response of any closed loop system. It is used specifically in system applications involving the control of drives to provide zero steady state error between Setpoint and Feedback, together with good transient performance.

Proportional Gain (PROP. GAIN)

This is used to adjust the basic response of the closed loop control system. The speed error is multiplied by the Proportional Gain to produce a motor current demand.

Integral (INT. TIME CONST.)

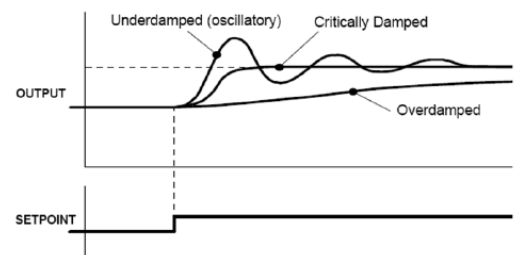
The Integral term is used to reduce steady state error between the setpoint and feedback values of the controller by accumulating current demand in proportion to the error input. If the integral is set to zero, then there will always be a steady state error.

A Method for Setting-up the PI Gains

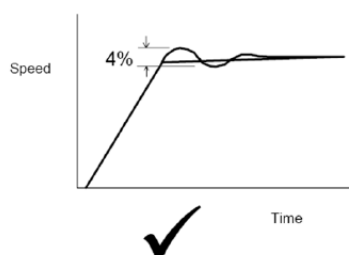
The gains should be set-up so that a critically damped response is achieved for a step change in setpoint. An underdamped or oscillatory system can be thought of as having too much gain, and an overdamped system has too little.

To set up the P gain, set the I gain to zero. Apply a step change in setpoint that is typical for the System, and observe the speed feedback response on terminal A7. Increase the gain and repeat the test until the system becomes oscillatory. At this point, reduce the P gain until the oscillations disappear. This is the maximum value of P gain achievable.

If the steady state error is significant, i.e. the feedback is not sufficiently close to the setpoint value, the I term needs to be used. As before, increase the I gain and apply the step change. Monitor the output. If the output becomes oscillatory, reduce the P gain slightly. This should reduce the steady state error. Increasing the I gain further may reduce the time to achieve zero steady state error.

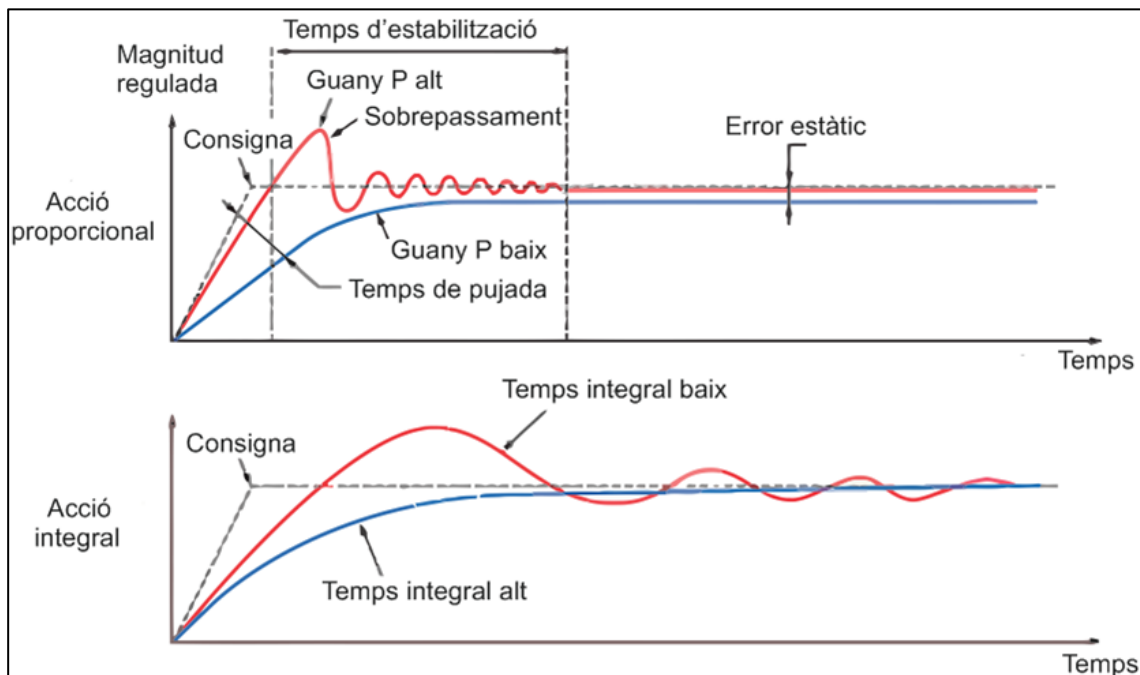


Correct Response



Critically Damped Response with no more than 4% of maximum speed from first overshoot to first undershoot

També adjuntem un resum de la influència de les accions proporcional i integral en un regulador PI:



| <i>Paràmetre</i> | <i>Temps de pujada</i> | <i>Sobrepassament</i> | <i>Temps d'estabilització</i> | <i>Error estàtic</i> |
|---------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|
| Guany proporcional | ↓↓ | ↑ | = | ↓ |
| Temps integral | ↓ | ↑↑ | ↑ | ↓↓ |

PROVES DE LA REGULACIÓ DE VELOCITAT. EXERCICIS

- Resposta a rampes i/o graons de consigna per pujar la velocitat. No es canvia de quadrant. Observar que el sistema regula correctament. També es pot observar si actua transitòriament el limitador de consigna de velocitat
- Resposta a graons de parell.
- Resposta a rampes i/o graons de consigna per baixar la velocitat sense canvi de sentit de gir. Observar l'acció de frenat i quadrants de treball.

- Inhibir el pont B i observar novament la resposta a rampes i/o graons per baixar la velocitat. Observar els quadrants de treball. Comparar la resposta amb l'exercici anterior.
- Resposta a rampes i/o graons per canviar el sentit de gir. Observar les accions de frenat i acceleració i els quadrants de treball.