



e-Learning tools for Electrical Engineering

Temática – Máquinas Eléctricas

Capítulo – Máquina Síncrona

Secção –

LIGAÇÃO À REDE

INTRODUÇÃO

Esta primeira página contém uma apresentação genérica do recurso.

- pré-requisitos:
- nível : Bases de Engenharia Electrotécnica ou Área de Especialização
- recursos relacionados :
- duração estimada : 1 hora
- autor: [Francis Labrique](#)
- realização : Sophie Labrique
- versão portuguesa : [Maria José Resende](#)



Este projecto é financiado pela União Europeia no âmbito de uma acção Sócrates-Minerva. As informações nele contidas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores. A União Europeia declina toda a responsabilidade relativamente ao seu uso.

GUIA DO LABORATÓRIO

A figura 1 mostra, esquematicamente, a máquina síncrona ligada à rede de 50 Hz através de um transformador. Do ponto de vista da máquina, a rede comporta-se como uma fonte trifásica equilibrada, ligada em estrela, com uma frequência angular $\omega_{\infty} = 2\pi \cdot 50$ e de valor eficaz $V_{\infty} = 220 \text{ V}$. As reactâncias $jX_g = j\omega_{\infty} \ell_g$ correspondem às indutâncias de fugas (dispersão) do transformador que liga a máquina à rede. Admite-se que o seu valor é de $j0,3\Omega$

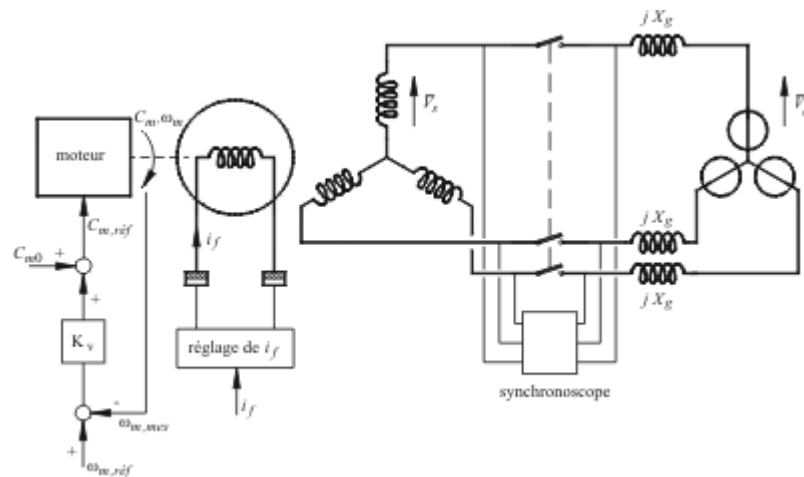


Figura 1

O regulador de velocidade que comanda o binário desenvolvido pelo motor de accionamento é um regulador proporcional com um termo de acção predictiva de forma a poder variar a potência fornecida pela máquina à rede.

1. Sincronização entre a máquina síncrona e a rede

Para regular a velocidade da máquina há que:

- colocar a referência da velocidade num valor $\omega_{m,ref}$ sensivelmente igual a ω_{∞}/P onde P representa o número de pares de pólos da máquina;
- colocar a zero o termo de acção predictivo C_{m0} .

Regula-se o valor eficaz das forças electromotrizs induzidas nas fases do estator de forma a obter o mesmo valor eficaz das tensões nas fases da rede. Como o regulador é do tipo proporcional, a velocidade real é ligeiramente inferior à velocidade de referência devido ao binário de atrito que se opõe à rotação do rotor. A muito ligeira diferença de frequências entre as tensões da rede e as forças electromotrizs desenvolvidas pela máquina, surge como uma lenta desfasagem entre os dois sistemas de tensões.

O paralelo efectua-se no momento em que os dois sistemas se encontram em fase; o disjuntor que liga a máquina à rede deverá ser fechado no momento em que são nulas as diferenças de potencial aos seus terminais. Desta forma, o fecho do disjuntor não dá origem a qualquer corrente de circulação entre a rede e a máquina. Admite-se ter respeitado a sequência de fases nas ligações. Para

efectuar a sincronização dispõe-se de um sistema de fogos girantes que permite obter informação relativamente:

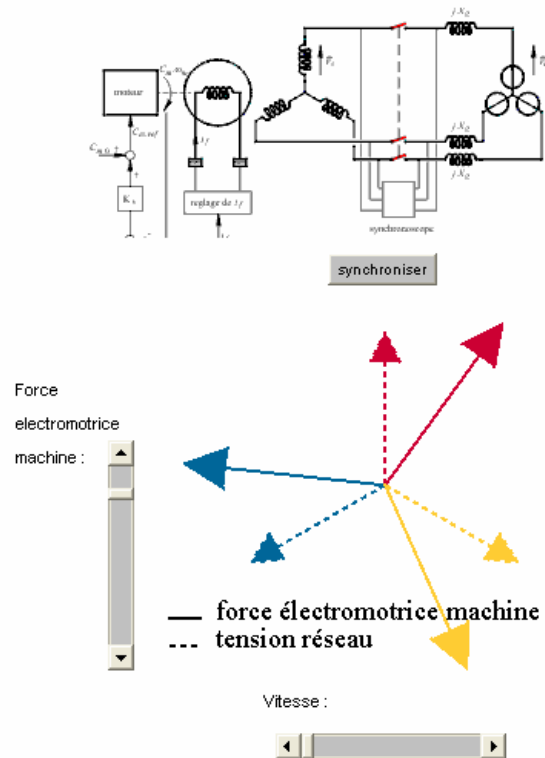
- aos valores eficazes das tensões da rede e aos valores eficazes das tensões aos terminais da máquina;
- à diferença de frequências entre os dois sistemas de tensões, vista como um desfasamento de posição entre o sistema de fasores representando as tensões da rede e o sistema de fasores representando as tensões aos terminais da máquina. Com efeito, se a frequência angular ω_m das tensões aos terminais da máquina difere da frequência angular ω_{oc} das tensões da rede, os fasores associados às tensões aos terminais da máquina rodam a uma frequência angular $\omega_m - \omega_{oc}$ relativamente aos associados às tensões da rede.

A animação seguinte esquematiza as informações fornecidas pelo sistema de fogos girantes, representando o valor eficaz e a posição relativa dos fasores (de frequência ω_m) das tensões aos terminais da máquina, relativamente aos fasores de frequência ω_{oc} das tensões da rede. A condição de sincronização é atingida assim que estes dois sistemas de fasores sejam coincidentes em posição e em valor eficaz.

Pode fazer variar:

- a velocidade de referência
- a corrente

de forma a obter as condições que permitem a sincronização. Assim que pense ter atingido estas condições, carregue no botão "sincronizar".



2. Regulação do ponto de funcionamento

Uma vez feito o paralelo com a rede, pode-se fazer variar o ponto de funcionamento actuando sobre C_{m0} (Figura 1)

sobre o binário C_m que o motor de accionamento desenvolve sobre a corrente indutora i_f .

Como os motores utilizados para accionar a máquina síncrona (turbina a gás ou a vapor, turbina hidráulica, motor térmico) não são reversíveis, a conversão de energia só pode efectuar-se segundo o sentido gerador (também denominada de alternador) da máquina síncrona. Para determinar qual o ponto de funcionamento correspondente aos valores dados de C_m e i_f , vão-se desprezar as perdas mecânicas, magnéticas e perdas de Joule $3R_s I_s^2$ nos enrolamentos do estator, uma vez que a sua ordem de grandeza é negligenciável face à potência nominal da máquina. Nestas condições, a potência mecânica produzida pelo motor de accionamento é igual à potência eléctrica fornecida à rede. Utilizando o diagrama vectorial relacionando E_0 , V_{∞} e I_s , pode escrever-se, sendo P o número de pares de pólos da máquina (figura 2)

$$P_{elec} = C_m \frac{\omega_{\infty}}{p} = 3V_{\infty} I_s \cos \varphi = \frac{3V_{\infty} E_0 \sin \delta}{X_g + X_s} \quad (1)$$

O valor de i_f fixa a amplitude de E_0 ; a extremidade de E_0 localiza-se numa circunferência de raio E_0 centrada na origem de V_{∞} .

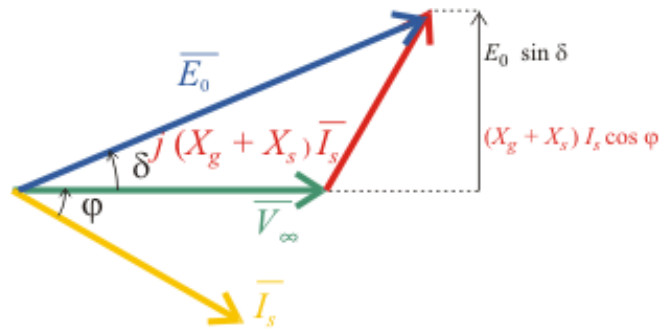


Figura 2

O valor de C_m fixa a amplitude de $E_0 \sin \delta$ atendendo a (1); a extremidade de E_0 localiza-se numa recta paralela a V_∞ situada a uma distância $E_0 \sin \delta$ igual a:

$$\frac{C_m \frac{\omega_\infty}{p} (X_g + X_s)}{3V_\infty}$$

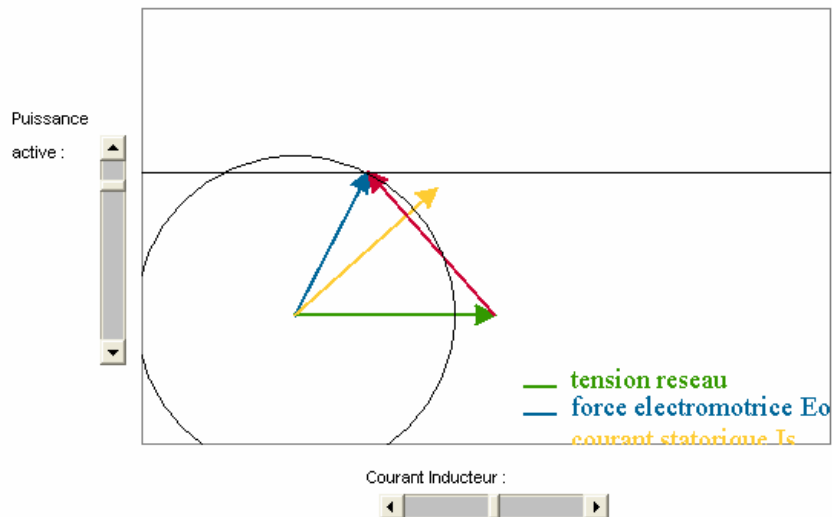
O ponto de intersecção da circunferência com a recta, a que corresponde a um valor de δ compreendido entre 0 e $\pi/2$, representa a extremidade de E_0 . Uma vez conhecido E_0 obtém-se imediatamente $j(X_g + X_s)I_s$ e I_s .

Se, para um dado valor de i_f , se aumenta $E_0 \sin \delta$ actuando sobre C_m , o ângulo δ aumenta: assim que se ultrapassa o valor de $\pi/2$, deixa de ser possível obter um ponto de funcionamento estável, a máquina perde o sincronismo, o que provoca um transitório violento que faz actuar os sistemas de protecção abrindo o disjuntor que liga a máquina à rede.

Se, para um dado valor de $E_0 \sin \delta$ (e, portanto, de C_m), se diminuir i_f , o ângulo δ aumenta: assim que ultrapassa o valor de $\pi/2$, a máquina perde o sincronismo.

A animação seguinte permite visualizar a evolução do ponto de funcionamento em função:

- da potência activa P fornecida à rede, representada pela grandeza $E_0 \sin \delta$ que é uma sua imagem
- da corrente de excitação i_f , que fixa a amplitude de E_0 .



Animação

Determinar os valores de C_m e i_f quando a máquina fornece uma potência activa P de 20 kW e uma potência reactiva Q de 10 kvar. Considere as duas situações possíveis:

- a potência reactiva é indutiva
- a potência reactiva é capacitiva.

AJUDA

- Desprezam-se as perdas mecânicas, magnéticas e as perdas de Joule nos enrolamentos do estator.
- Traçar o diagrama vectorial que relaciona V_{co} a E_0 e a I_s desprezando o termo $R_s I_s$.

RESPOSTA >>

$$C_m = 127,3 Nm$$

$$i_f = 2,06 A$$

QUESTÃO 1: DEMONSTRAÇÃO

Tem-se (Figura 2) :

$$I_S \cos \varphi = \frac{V_{s,ref} \sin \delta'}{X_g}$$

$$I_S \sin \varphi = \frac{V_{s,ref} \cos \delta' - V_{\infty}}{X_g}$$

$$E_0 \sin \delta = (X_g + X_s) \cdot I_S \cos \varphi$$

$$E_0 \cos \delta = (X_g + X_s) \cdot I_S \sin \varphi + V_{\infty}$$

pelo que se obtém

$$\tan \delta = \frac{(X_g + X_s) I_S \cos \varphi}{(X_g + X_s) I_S \sin \varphi + V_{\infty}}$$

$$\tan \delta = \frac{(X_g + X_s) V_{s,ref} \sin \delta' / X_g}{(X_g + X_s) \cdot \left[\frac{V_{s,ref} \cos \delta' - V_{\infty}}{X_g} \right] + V_{\infty}} \quad (1)$$

Por outro lado, tem-se

$$P_{elec} = \frac{3V_{\infty} V_{s,ref} \sin \delta'}{X_g} \quad (2)$$

De (1) obtém-se o valor de δ aplicando a função arco de tangente (arctan) aos dois membros

$$\delta = \arctan \left[\frac{(X_g + X_s) V_{s,ref} \sin \delta' / X_g}{(X_g + X_s) \left[\frac{V_{s,ref} \cos \delta' - V_{\infty}}{X_g} \right] + V_{\infty}} \right]$$

As equações que permitem calcular δ e P_{elec} em função de δ' são um sistema de equações paramétricas da curva P, δ .