

Manuel Vaz Guedes

MÁQUINAS ELÉCTRICAS SÍNCRONAS

arranque dos motores síncronos

FACULDADE de ENGENHARIA
UNIVERSIDADE do PORTO

2003

MÁQUINAS ELÉTRICAS SÍNCRONAS

arranque dos motores síncronos

Manuel Vaz Guedes

FACULDADE de ENGENHARIA
UNIVERSIDADE do PORTO

Índice

Introdução

1. *O Problema do Arranque do Motor Síncrono*
 - 1.1. Início do Arranque
 - 1.2. Aceleração até à Velocidade de Sincronismo
 - 1.3. Sincronização com a Rede de Alimentação
2. *Métodos de Arranque do Motor Síncrono*
 - 2.1. Arranque com o Auxílio de Outro Motor
 - 2.2. Arranque Síncrono
 - 2.3. Arranque Assíncrono
 - 2.4. Arranque Assíncrono–Síncrono
3. *Critérios de Selecção do Método de Arranque*
 - 3.1. O problema do Arranque e a Aplicação do Motor
 - 3.1.1. Compensador Síncrono
 - 3.1.2. Accionamento de Compressores
 - 3.1.3. Accionamento de Bombas Hidráulicas
 - 3.1.4. Accionamento com Motores Síncronos Especiais
 - 3.1.5. Domínio de Aplicação
 - 3.2. Critérios de Selecção
4. *O Accionamento de Bomba–Turbina*
 - 4.1. A Água
 - 4.2. A Bomba–Turbina
 - 4.3. Diagrama de Funcionamento da Bomba–Turbina
 - 4.4. O Motor–Alternador
 - 4.5. O Aproveitamento Hidroeléctrico do Torrão
5. *Elementos de Máquinas Eléctricas*
 - 5.1. Máquina Eléctrica n–m
 - 5.2. Modelização com Correntes de Foucault
 - 5.3. Sincronização de Fases
 - 5.4. Fenómeno de Görges
 - 5.5. O Binário Oscilatório
 - 5.6. Díodos No Circuito Indutor
 - 5.7. Binário Sincronizante
 - 5.8. Máquina Síncrona de Pólos Comutáveis

Apêndice

A – Conversor de Frequência

Bibliografia

Símbolos para Grandezas e Unidades

Resenha Histórica

MÁQUINAS ELÉCTRICAS SÍNCRONAS

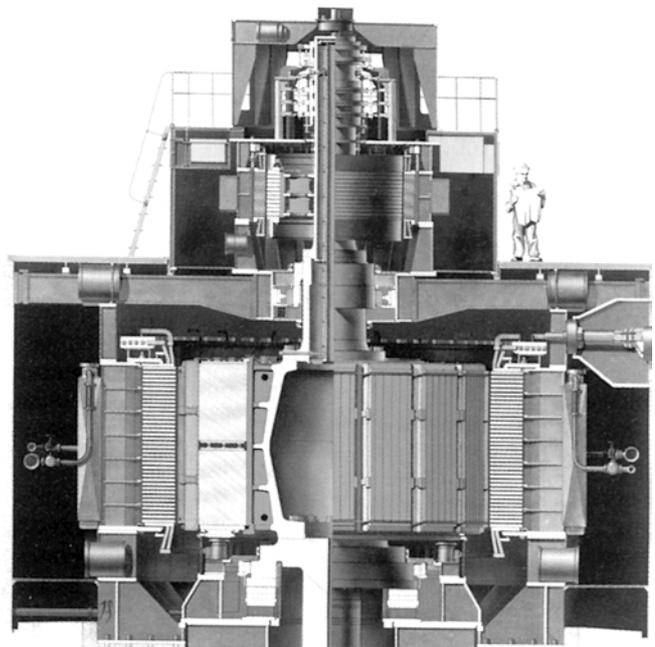
arranque dos motores síncronos

Manuel Vaz Guedes

FACULDADE de ENGENHARIA
UNIVERSIDADE do PORTO

A máquina eléctrica síncrona é uma máquina que promove uma transformação de energia envolvendo energia mecânica e energia eléctrica. É comum nas aplicações desta máquina eléctrica que a energia eléctrica tenha as características de um sistema de grandezas alternadas trifásicas. Nessa conversão de energia, que se efectua com um rendimento energético muito elevado, há uma razão constante entre a frequência da força electromotriz induzida pelo campo magnético indutor e a velocidade angular de rotação da máquina: $f = p \cdot n$.

Quando se pretende trabalhar com a máquina eléctrica síncrona como motor surge o **problema do arranque**.



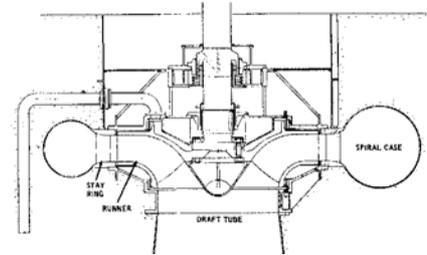
Motor-Alternador Síncrono Trifásico (2-p = 16; BBC 1983)

A máquina síncrona quando está parada e é ligada a uma rede eléctrica potente não tem a possibilidade natural de desenvolver um binário de arranque, além de que não tem capacidade de estabelecer uma sincronização natural entre as grandezas de fase da rede e as grandezas eléctricas geradas pela máquina. O resultado é que um “arranque” directo e brusco de uma máquina síncrona a partir de uma rede eléctrica seria prejudicial para a qualidade de serviço da rede

devido aos fenómenos transitórios intensos que tal acção originaria, e seria prejudicial para a máquina.

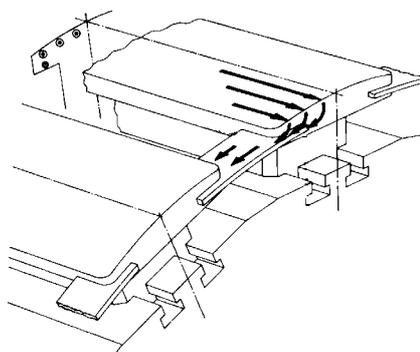
Para resolver o problema do arranque de uma máquina síncrona desenvolveram-se, ao longo do tempo, métodos de arranque que foram evoluindo com o aumento gradual da potência unitária das máquinas síncronas aplicadas.

Se o problema do funcionamento em paralelo de duas máquinas síncronas (monofásicas) foi estudado pela primeira vez por H. Wilde em 1868, foi com a frequente utilização de máquinas síncronas como compensador síncrono na década de vinte do século passado, e também com a utilização da unidade bomba-turbina em plena década de cinquenta do século vinte, e foi também com a aplicação de máquinas síncronas de 230 MVA funcionando como motor-alternador em 1975 que os problemas do arranque das máquinas síncronas foram estudados e sistematizados.



Hoje, a selecção do método de arranque de uma máquina síncrona funcionando como motor pode fundamentar-se em aspectos técnicos e em aspectos económicos com base no equipamento de accionamento, na capacidade da rede eléctrica de alimentação e no custo global. Desde logo se verifica a importância da normalização dos equipamentos, principalmente para a gama de potência nominal que abrange as aplicações industriais do motor síncrono trifásico.

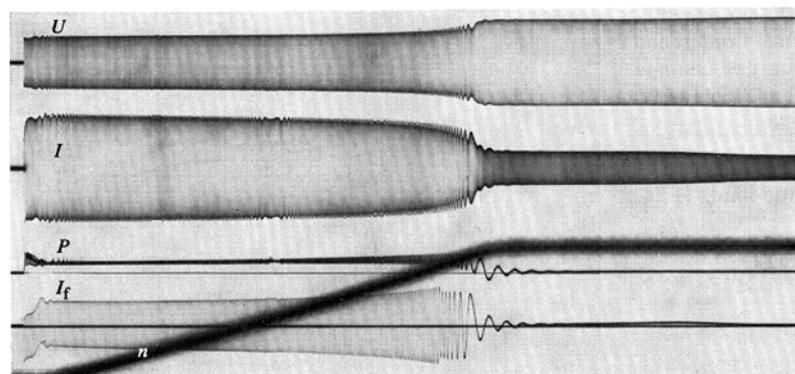
Apesar das muitas aplicações industriais do motor síncrono trifásico, existe um tipo de aplicação da máquina síncrona — *motor-alternador para aproveitamentos hidroeléctricos* — que na actualidade tem uma importância grande e se antevê que essa importância aumentará no futuro. A necessidade de armazenar ou de movimentar grandes quantidades de água, para aproveitamento agrícola, na produção de energia eléctrica ou apenas na regularização dos caudais de um curso de água, e as preocupações sociais contemporâneas com a utilização da água contribuem para dar importância ao estudo do problema do arranque dos motores síncronos trifásicos utilizados no sistema de bombagem.



Para uma compreensão dos problemas electromecânicos ligados aos diferentes métodos de arranque do motor síncrono torna-se necessário estudar alguns aspectos do funcionamento das máquinas eléctricas, quer quanto aos fenómenos ligados ao seu comportamento quer quanto a alguns aspectos construtivos, quer ainda quanto ao projecto e aos elementos das instalações eléctricas específicas.

Neste texto, com carácter didáctico, apresentam-se os elementos capazes de permitirem o estudo actualizado dos problemas ligados ao arranque do motor síncrono, assim

como o estudo dos assuntos ligados a esta situação particular do funcionamento das máquinas eléctricas síncronas.



Arranque assíncrono directo (230 MVA; 15,75 kV; 50 Hz; 333,3 rot/min)

1 – O Problema do Arranque do Motor Síncrono

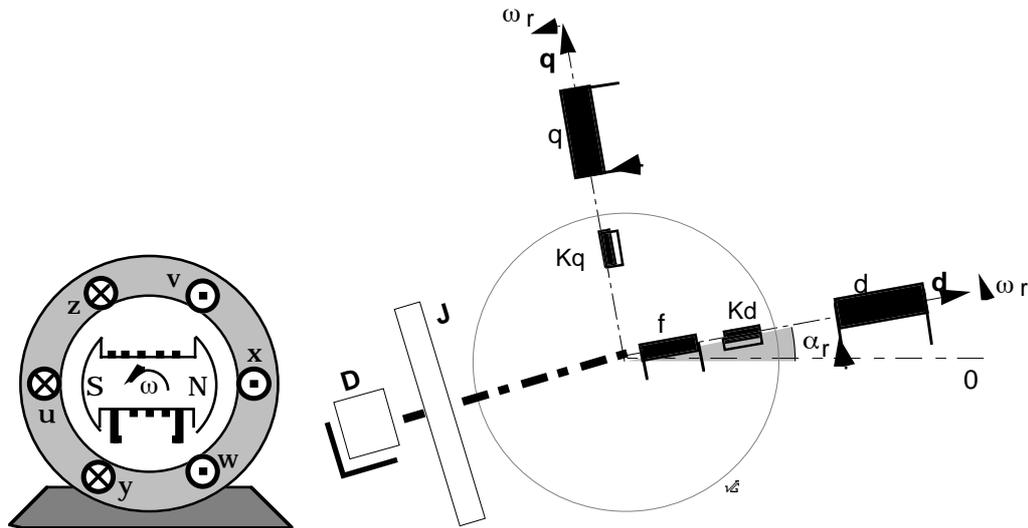
O motor síncrono trifásico, devido às suas características específicas que resultam das suas particularidades construtivas, apresenta problemas quando tem de passar do estado de repouso ao funcionamento em velocidade de regime – durante o *arranque*.

Durante este processo de arranque a acção do motor síncrono será a de vencer o binário resistente que a carga mecânica ofereça T_{Cr} , o binário de atrito T_a criado nos apoios do veio da máquina e da carga mecânica e o binário de inércia T_J provocada pelas partes do motor e da carga mecânica em movimento rotativo. Esta acção do motor tem de ocorrer sem que haja quebra da qualidade de serviço da rede eléctrica de alimentação, ou o aparecimento de fenómenos transitórios capazes de provocarem a avaria do sistema eléctrico.

Para analisar esses problemas pode-se recorrer ao modelo de Park da máquina síncrona com pólos salientes, funcionando como motor (ver: *Máquina Eléctrica Síncrona – modelização*).

Modelo do Motor Síncrono

Considerando o motor síncrono trifásico real, com saliência no circuito magnético e com enrolamentos amortecedores, reduzido à máquina primitiva num referencial móvel com o rotor da máquina (r ; d , q) através de um conjunto de condições de estudo,



as equações que representam o modelo matemático da máquina, e que regem o seu funcionamento, são:

$$w \quad \{y'\} = [L'] \cdot \{i'\}$$

$$w \quad u_d = R_s \cdot i_d + p \cdot \psi_d - \omega_r \cdot \psi_q \quad u_f = R_f \cdot i_f + p \cdot \psi_f$$

$$w \quad u_q = R_s \cdot i_q + p \cdot \psi_q + \omega_r \cdot \psi_d \quad u_{Kd} = R_{Kd} \cdot i_{Kd} + p \cdot \psi_{Kd}$$

$$w \quad u_o = R_s \cdot i_o + p \cdot \psi_o \quad u_{Kq} = R_{Kq} \cdot i_{Kq} + p \cdot \psi_{Kq}$$

$$T_{el} = (3 \cdot p / 2) \cdot (M_{af} \cdot i_f \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q + (M_{aKd} \cdot i_{Kd} \cdot i_q - M_{aKq} \cdot i_{Kq} \cdot i_d))$$

$$w \quad T_{el} = (3 \cdot p / 2) \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) = k \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d)$$

$$w \quad T_m = (J / p) \cdot (d\omega_r / dt) + D \cdot (\omega_r / p) + T_{Cr}$$

Salientam-se na expressão do binário electromecânico as suas componentes: o *binário de excitação síncrono*; o *binário de relutância* devido à anisotropia do circuito magnético e o *binário assíncrono*, devido à existência dos circuitos amortecedores.

A partir deste modelo matemático do motor síncrono trifásico, e considerando apenas que se encontra a funcionar em regime permanente sinusoidal síncrono simétrico e equilibrado, torna-se possível escrever as equações simbólicas de funcionamento eléctrica e electromecânica:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= R_s \cdot \underline{I} + jX_q \cdot \underline{I} + j(X_d - X_q) \cdot \underline{I}_d + \underline{E}_o(I_f) \\ T_{em} &= \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \cdot \left(\frac{U \cdot E_o}{X_d} \sin \delta + \left(\frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \right) \cdot U^2 \sin 2\delta \right) \end{aligned}$$

Neste regime de funcionamento a componente de binário assíncrono não contribui para o binário electromecânico, porque em regime permanente sinusoidal síncrono a corrente eléctrica nos enrolamentos amortecedores é nula.

A análise da situação de arranque através das expressões para o binário electromecânico, atendendo ao modo como foram deduzidas, permite caracterizar o problema do arranque do motor síncrono trifásico.

No momento em que as bobinas de fase estatóricas do motor são ligadas à rede, em que a velocidade do rotor ainda é nula,

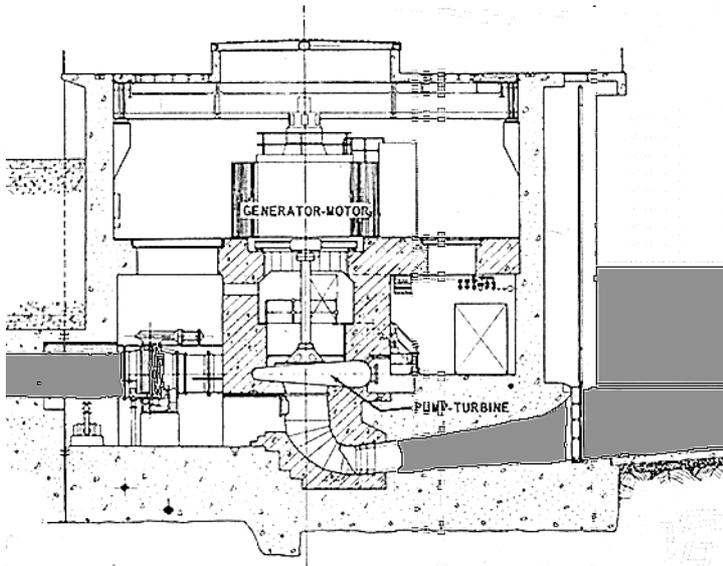
- atendendo à expressão do binário para o modelo de Park da máquina síncrona funcionando como motor, verifica-se que a corrente eléctrica segundo o eixo em quadratura tem variação sinusoidal, e o binário de excitação síncrono médio é nulo $T_{elmed} = K \cdot (M_{af} \cdot i_f \cdot i_q) = 0$.
Devido à velocidade do rotor ser nula, a velocidade relativa entre o referencial do estator e o referencial do rotor é nula, e a transformada de Park degenera na transformada do número de fases. Assim, existindo corrente eléctrica sinusoidal nas três fases estatóricas (i_a, i_b, i_c), a corrente na bobina estatórica do eixo directo (i_q) num referencial solidário com o campo girante criado pelas correntes nas bobinas de fase (campo de reacção do induzido) terá uma variação sinusoidal {em lugar de ser constante como no regime permanente sinusoidal simétrico}. O binário de excitação síncrono terá uma variação sinusoidal — $(T_{el})_{\sim} = (3 \cdot p/2) \cdot (M_{af} \cdot i_f \cdot i_q)$ — e o seu valor médio é nulo.
- atendendo à expressão do binário para o regime permanente sinusoidal simétrico verifica-se que sendo o campo magnético indutor constante (porque é criado por corrente contínua) e sendo nula a velocidade relativa entre o campo magnético e os condutores do estator (máquina parada) nestes não se induz força electromotriz, portanto a força electromotriz em vazio com a máquina parada é nula ($E_o = 0$) e assim nesse momento não existe binário de excitação — $T_{el} = (3/(2 \cdot \pi \cdot n_s)) \cdot (U \cdot E_o/X_d) \cdot \sin(\delta)$.
- atendendo à expressão completa para o binário electromotor pode-se verificar que no momento do arranque, não existindo binário de excitação, poderá haver condições para a existência de um binário de relutância e poderá haver condições para a existência de um binário assíncrono. Estes binários a existirem podem não ter amplitude suficiente para promover o arranque do motor.

Se no momento de ligação à rede de alimentação o motor síncrono não possui um binário de arranque eficaz, torna-se necessário levá-lo do estado de repouso até ao funcionamento em velocidade de regime ligado a uma rede eléctrica de alimentação mediante a aplicação de um processo específico.

No decorrer do processo de arranque o motor síncrono passará por diferentes fases, cada uma com a sua característica própria, com os seus perigos e com as necessárias soluções técnicas para esses problemas. Fundamentalmente no processo de arranque de um motor síncrono existem as seguintes fases: início do arranque (breakway); aceleração até à velocidade de sincronismo — **lançamento** (run up); e sincronização com a rede de alimentação (pull in).

1.1 Início do Arranque

No momento em que se inicia o arranque o motor deve vencer todo o binário de atrito seco nos seus mancais e nos mancais da carga mecânica com que arranca. Isto terá de ser feito sem que haja alteração das características de funcionamento da rede eléctrica.



Medidas no local permitem prever que a potência a vencer para movimentar a bomba/(turbina) dum aproveitamento hidroeléctrico com bombagem no interior da evoluta espiral desafogada, é de 0,4% a 0,6% da potência nominal, para grandes máquinas com uma potência de 67 a 140 MW e velocidades de rotação de 86 a 500 rot/min. Para diminuir o binário a vencer pelo motor síncrono durante todo o período de arranque, faz-se baixar o nível da água, abaixo do nível da bomba, com ar comprimido.

O binário de atrito seco a vencer por uma máquina daquele tipo (motor/bomba) é de 5% a 15% do binário nominal. Por isso utiliza-se neste tipo de montagens um sistema de lubrificação forçada dos mancais com bombagem contínua e a alta pressão do óleo lubrificante

O problema mecânico de reduzir o binário de atrito no início do arranque é, habitualmente resolvido através da adopção de métodos especiais de lubrificação.

Quando o motor síncrono está permanentemente ligado a uma carga mecânica pesada pode-se provocar um banho de óleo sobre pressão no veio na zona dos mancais, sobrelevando o veio, imediatamente antes de iniciar o arranque.

Já o problema de alteração das características de funcionamento da rede eléctrica de alimentação, se a ligação à rede eléctrica se der no momento inicial do arranque, é resolvido pela alteração das características construtivas do motor síncrono, procurando-se:

- aumentar o binário desenvolvido no momento de ligação, contando mesmo com o fenómeno electromecânico transitório que nesse momento pode ocorrer, e
- diminuir a amplitude da sobreintensidade de corrente eléctrica na rede de alimentação.

Para aumentar o binário no momento de arranque, altura em que o deslizamento será alto, utiliza-se a técnica de aprofundar as ranhuras do enrolamento que serve de enrolamento de arranque: um enrolamento amortecedor (gaiola profunda); ou um enrolamento próprio, ao qual se pode ligar através de escovas-colector de anéis uma resistência variável. Estas alterações dos aspectos construtivos traduzem-se na alteração do valor da indutância directa L_{Kd} e em quadratura L_{Kq} do circuito amortecedor. O valor da resistência eléctrica do circuito pode condicionar o aparecimento de alterações bruscas da curva característica do binário $T(s)$, com o aparecimento de uma diminuição brusca para $s = 0,5$ (fenómeno de Görges) a outra perto da velocidade de sincronismo ($s \approx 0$). Por construção, pode-se criar no rotor do motor um circuito de arranque secundário projectada para provocar e a diminuição da corrente que circula no circuito primário durante o arranque.

O valor da sobreintensidade que ocorre no momento inicial de arranque ainda pode ser diminuído com a utilização de uma *método de arranque com tensão reduzida*.

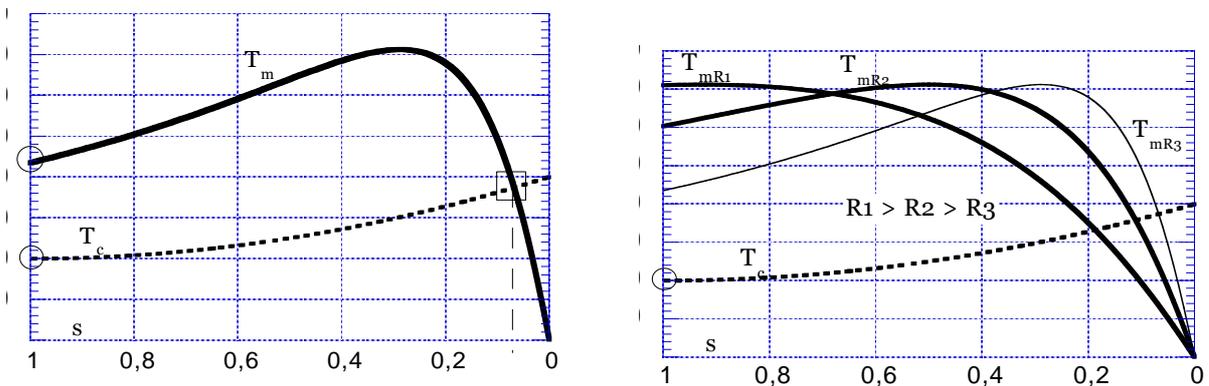
1.2 Aceleração até à Velocidade de Sincronismo

Para que o motor síncrono, durante o arranque, provoque o aumento da velocidade — *lançamento* — até ao valor para o qual pode ocorrer a sincronização com a rede de alimentação é necessário que o binário desenvolvido pelo motor (binário motor T_m) seja superior ao binário resistente apresentado pela carga mecânica — $T_m > T_r$.

Se o motor síncrono estiver ligado à rede eléctrica o seu comportamento é o característico de uma máquina assíncrona (com assimetria eléctrica e magnética do circuito rotórico), baseado na indução de

força electromotriz nos circuitos eléctricos do rotor — nos circuitos amortecedores, na parte não ranhurada das expansões polares (e por isso a máquina poderá ser de pólos maciços) e no circuito indutor — que por estarem fechados originam a circulação de correntes eléctricas que irão interagir com o campo magnético girante, criado pelo circuito eléctrico polifásico estatórico.

Nesta fase do andamento do arranque do motor síncrono são importantes os aspectos construtivos que podem contribuir para as características de funcionamento, como máquina eléctrica assíncrona, do motor em arranque. Para além de ter um binário de arranque que ultrapasse o binário de arranque da carga em repouso ($s=1$), é necessário que o ponto de funcionamento do conjunto motor-carga mecânica ($T_m = T_c$) fique próximo do ponto de sincronismo ($s = 0$), ou com um deslizamento muito baixo (positivo ou negativo!; isto é: eventualmente o conjunto motor-carga pode ser conduzido até uma velocidade ligeiramente superior à velocidade de sincronismo)



Toda esta variação das características de funcionamento pode ser obtida mediante um reóstato ligado ao circuito rotórico de arranque; foi a solução adoptada no motor síncrono de indução e no motor síncrono de indução de pólos salientes. Quando se utiliza um reóstato líquido (infinitude de pontos) pode-se actuar de forma a que o motor esteja sempre a desenvolver o binário máximo durante o aumento da velocidade.

1.3 Sincronização com a Rede de Alimentação

Na maioria das situações possíveis a **sincronização** — processo pelo qual uma máquina eléctrica é posta numa situação em que há identidade de frequências das grandezas eléctricas da máquina e dos respectivos ângulos de fase com as grandezas de uma rede eléctrica ou de uma outra máquina eléctrica — é um processo complicado.

Considerando uma rede eléctrica alternada com uma tensão de amplitude U e com uma frequência f , e um motor síncrono com um número de pares de pólos p , a que corresponde a velocidade de sincronismo n_s , pode-se caracterizar o momento de sincronização.

O motor síncrono, através de um processo adequado, é conduzido a uma velocidade próxima (superior ou inferior) à velocidade de sincronismo.



Liga-se a excitação do motor síncrono. O motor fica assim a funcionar a uma velocidade próxima da velocidade de sincronismo {modo assíncrono} e excitado de forma a que surge uma tensão nos seus terminais de amplitude U_m , muito próxima da tensão da rede U .

Quando se liga o motor à rede eléctrica de alimentação (paralelo do motor com a rede eléctrica) surge uma corrente eléctrica de circulação na malha (rede + motor) — **corrente sincronizante** — e um binário mecânico — **binário sincronizante** — que tende a estabelecer o sincronismo entre os dois sistemas

trifásicos de grandezas eléctricas. A acção desse binário coloca o motor síncrono a funcionar nas condições que satisfazem o sincronismo de fases entre a rede eléctrica e o motor.

Ver Elementos de Máquinas Eléctricas 5.7

No caso mais simples, quando o binário resistente de arranque é pequeno, a máquina pode sincronizar-se por si própria por acção do binário assíncrono (com carácter oscilatório) desenvolvido, sendo pequena a influência do binário sincronizante. Mas, neste caso simples, se a sincronização com a rede se dá com a polaridade trocada, haverá um deslizamento da roda polar (“*perde o passo*”) correspondente a π rad. elect. quando se ligar a excitação. Esta situação pode induzir a ocorrência de oscilações pendulares no motor síncrono.

Na situação mais complicada, e quando a velocidade do motor é inferior à velocidade de sincronismo, o binário sincronizante deve exceder o binário de carga para assegurar a aceleração das massas rotóricas, isto é o binário motor excedente deve ser suficiente para vencer o binário de inércia combinado do motor e da carga mecânica até à velocidade de sincronismo.

A sincronização de uma máquina síncrona, em funcionamento assíncrono, e com um deslizamento s_m depende do binário resistente T_c , do deslizamento s_m e da corrente de excitação I_f .

Sincronização

As condições de sincronização de uma máquina síncrona com um sistema eléctrico são:

- **igualdade das frequências** — correspondência entre a velocidade da máquina e a frequência das grandezas eléctricas do sistema, através da condição de sincronismo: $f = p \cdot n$;
- **igualdade das tensões eficazes** — igualdade da amplitude da tensão eléctrica,
- **igualdade das fases** — igualdade de fases da tensão da máquina e da tensão do sistema eléctrico no ponto de ligação.

Estas condições de sincronismo podem ser verificadas no sistema a sincronizar mediante a utilização de instrumentos de medida que dêem informação sobre a velocidade da máquina face à velocidade de sincronismo — um **sincronoscópio** — sobre a amplitude da tensão — um **voltímetro** diferencial que dê indicação de ΔV — e sobre a frequência das grandezas da máquina e da rede — um **frequencímetro** diferencial ΔHz .

A correspondência entre os diferentes condutores de fase de um sistema polifásico é feita, definitivamente, na fase de montagem da instalação com o auxílio de um sistema de lâmpadas eléctricas numa montagem clássica.

ver Resenha Histórica — Sincronização

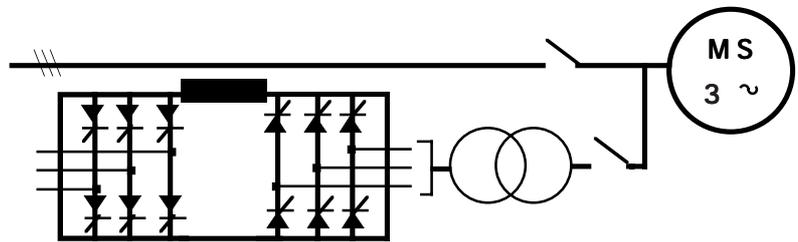
O estudo do momento e das condições de sincronização pode ser feito, por via computacional, com um modelo que envolva as grandezas eléctricas e mecânicas em presença. Torna-se possível com estes estudos determinar o momento (ângulo eléctrico) mais propício para a ligação da excitação, o valor do deslizamento a partir do qual pode ocorrer a sincronização (pull into step), e o comportamento do motor no momento da sincronização.

A solução técnica adoptada para o problema do arranque do motor síncrono depende, fundamentalmente, da capacidade do motor. No caso dos motores de pequena e média potência pode-se adoptar um processo de arranque que envolva pouca aparelhagem eléctrica auxiliar, enquanto que no caso de um motor de potência elevada a solução do problema pode envolver um método complicado e um conjunto de aparelhagem complexa.

Recorda-se que no Laboratório de Máquinas Eléctricas se pode utilizar um autotransformador para provocar o arranque de um motor síncrono ($S = 9 \text{ kVA}$) por aplicação de uma tensão reduzida (aplicação da tensão reduzida – sincronização – aumento de tensão até ao valor nominal). Já num aproveitamento hidroeléctrico é diferente o método de arranque de um motor-alternador ($S = 100 \text{ MVA}$; Agueira)

Condicionado pela capacidade do motor síncrono e pela importância do sistema eléctrico em que está inserido o método de arranque adoptado pode assumir diferentes formas.

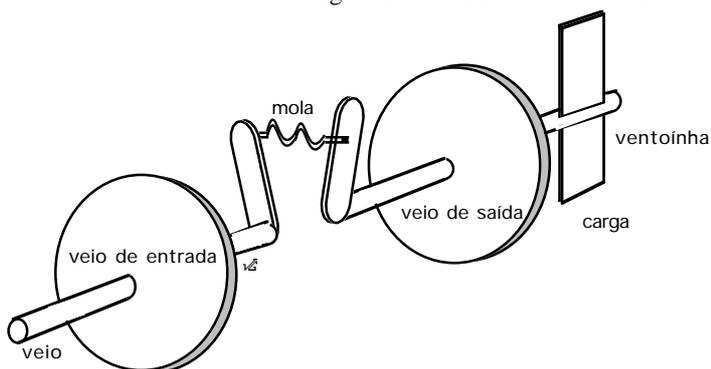
Quando está disponível uma fonte de alimentação independente – gerador auxiliar local – pode-se provocar um arranque com tensão reduzida ou com frequência reduzida. Quando a fonte de alimentação tem tensão e frequência constante já o método de arranque terá de tirar proveito do comportamento como motor assíncrono do motor eléctrico síncrono em fase de arranque. Se o motor síncrono estiver alimentado por um sistema de controlo de potência, então será esse sistema que criará as condições de arranque do motor através da variação das características das grandezas eléctricas de alimentação (amplitude, fase, frequência).



Sobressai do conhecimento das diversas soluções possíveis para o problema do arranque, que o método adoptado e o desenho da instalação dependem de muitos aspectos próprios de cada instalação eléctrica, que terão de ser analisados à luz de critérios económicos de aplicação dos meios disponíveis.

Analogia Mecânica

Quando o motor síncrono está a rodar a uma velocidade constante, e o binário de carga mecânica aumenta, passam-se um conjunto de fenómenos que podem ser explicados recorrendo a uma analogia com um sistema mecânico.



O sistema mecânico, representado na figura, é constituído por um veio de entrada que acciona um veio de saída e uma carga através de dois braços ligados por uma mola.

A mola exerce força tanto em compressão como em extensão, e os discos têm um grande momento de inércia.

Em regime permanente o veio de entrada e de saída rodam à mesma velocidade e o ângulo constante entre os dois braços é δ .

Se as pás da ventoinha são aumentadas, a carga mecânica aumentará e a velocidade diminuirá e a mola estender-se-á aumentando o ângulo entre os braços δ . O aumento da tensão na mola criará um binário extra, que aumentará a velocidade da carga e do disco de saída. Devido à inércia do disco este não parará, quando o ângulo δ atingir o valor correspondente à nova situação de carga, mas ultrapassará esse valor. Então a mola provocará um binário menor, o disco desacelerará, o ângulo aumentará de um valor menor e o processo repetir-se-á.

A analogia é entre a inércia do motor e da carga do motor e a inércia do disco de saída e o binário provocado pela mola corresponde ao binário motor da máquina síncrona.

2 — Métodos de Arranque do Motor Síncrono

Ao longo do tempo têm sido utilizados vários métodos de arranque do motor eléctrico síncrono, que costumam ser agrupados da forma seguinte:

- arranque {
- **com motor auxiliar**
 - **síncrono ou por variação de frequência**
 - **assíncrono**
 - **combinado (assíncrono - síncrono)**

Com o estudo dos diferentes métodos de arranque do motor síncrono pretende-se o conhecimento das propriedades, das vantagens e dos inconvenientes de cada método, assim como o esquema eléctrico típico utilizado em cada método na instalação eléctrica de força motriz.

2.1 — Arranque com o Auxílio de Outro Motor

Neste tipo de arranque é frequentemente utilizada uma outra máquina eléctrica para levar o motor síncrono até às condições de sincronização com a rede eléctrica de alimentação.

Este tipo de arranque é aplicado no caso do motor síncrono com os pólos indutores folheados e sem enrolamento amortecedor. Neste caso não seria possível contar durante o arranque com o binário assíncrono e o binário de relutância não seria suficiente, por si só, para o arranque da máquina síncrona ligada à carga mecânica. Um motor síncrono com os pólos indutores folheados e sem enrolamento amortecedor não poderia contribuir com binário motor suficiente para se efectuar o arranque.

Também no caso em que fosse imposto um valor muito baixo para a intensidade de corrente eléctrica de arranque teria de se utilizar um motor auxiliar.

O motor auxiliar recebe na literatura técnica anglo-saxónica o nome de "pony motor"

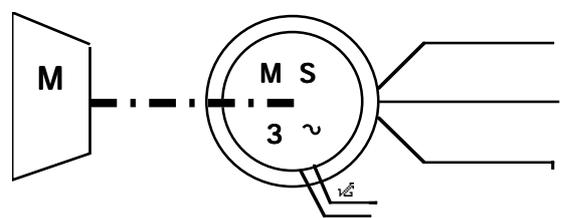
Como motor auxiliar pode ser utilizado um dos seguintes tipos de motor:

- motor hidráulico ou térmico — turbina hidráulica; turbina a vapor; turbina a gás;
- motor eléctrico:
 - motor de indução (com o rotor bobinado ou com o rotor em curto-circuito);
 - motor com colector de lâminas.

• **Motor hidráulico ou térmico**

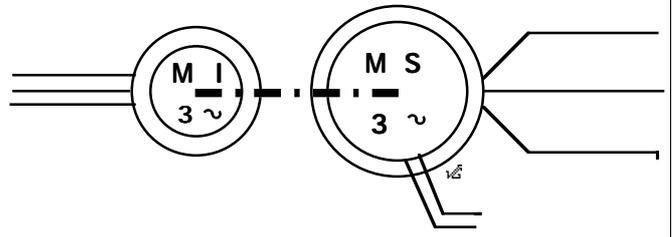
Quando se utiliza a turbina de accionamento de uma máquina síncrona para a arrancar como motor, e depois faz-se funcionar como a máquina eléctrica como compensador síncrono, tem-se de aceitar a importância das perdas em vazio da turbina (que ficará acoplada à máquina síncrona embora não a accione) e a necessidade de ter em funcionamento (alimentados em tensão) os equipamentos auxiliares necessários ao funcionamento da turbina.

Claro que os principais problemas deste método de arranque são do domínio das máquinas hidráulicas ou das máquinas térmicas.



• **Motor de indução**

O motor de indução, devido à sua vasta aplicação, apresenta-se como a solução mais barata para a utilização como motor auxiliar no arranque do motor síncrono. No entanto há, no seu funcionamento, uma particularidade a que se deve prestar atenção.



O motor de indução, como máquina assíncrona, funciona normalmente com uma velocidade próxima da velocidade de sincronismo (baixo deslizamento). Assim se o motor de indução tiver o mesmo número de pólos que o motor síncrono e se for alimentado pela mesma rede (mesma frequência de alimentação) resulta que o motor de indução terá a mesma velocidade de sincronismo que o motor síncrono. Nessa situação o motor de indução apenas será capaz de levar o motor síncrono a uma velocidade próxima, mas abaixo, da velocidade de sincronização com a rede eléctrica. Era necessário que o motor síncrono tivesse capacidade de “saltar” para o sincronismo. Por isto aplica-se um motor de indução com menos dois pólos magnéticos {menos um par de pólos} do que o motor síncrono, e, assim, o motor de indução não terá dificuldade em accionar o motor síncrono até à velocidade de sincronismo.

A sincronização do motor síncrono com a rede eléctrica a uma velocidade *ligeiramente inferior* à velocidade de sincronismo é feita:

- 1º) — ligando-se o enrolamento estatórico do motor síncrono à rede eléctrica;
- 2º) — promovendo a excitação do motor síncrono por actuação no circuito indutor.

Claro que no momento de ligação do enrolamento estatórico do motor síncrono à rede haverá o aparecimento de uma sobreintensidade que se atenuará em dois ou três ciclos: quando se liga a alimentação do circuito indutor, a corrente eléctrica demorará algum tempo a atingir o valor permanente, e durante este tempo o binário sincronizante vai aumentando de amplitude.

Uma outra forma de promover a sincronização — frequentemente utilizada — consiste em excitar a máquina síncrona até se obter a tensão nominal da rede, e, depois de se verificarem as condições de sincronismo, ligá-la à rede eléctrica. **É o processo utilizado no estabelecimento do paralelo entre alternadores.** {relembrar o Trabalho de Laboratório de Máquinas Eléctricas}

Quando o motor de indução conduz o motor síncrono a uma velocidade *ligeiramente superior* à velocidade de sincronismo convém realizar as operações:

1. desliga-se o motor auxiliar da rede;
2. liga-se o enrolamento estatórico do motor síncrono à rede eléctrica;
3. promove-se a excitação do motor síncrono por actuação no circuito indutor.

Desligando o motor auxiliar a velocidade do conjunto tenderá a diminuir, e a corrente de excitação terá atingido praticamente o seu valor final quando a velocidade for igual à velocidade de sincronismo. Desta forma será diminuta a sobreintensidade da corrente eléctrica de alimentação do motor síncrono.

O valor da sobreintensidade de ligação do motor síncrono à rede depende do valor do binário resistente que o motor tem de vencer no arranque; por isso depende do valor do binário que a carga mecânica necessita para alcançar a velocidade de sincronismo.

Mas, a escolha como método de arranque de um motor de indução está condicionada pelo valor do binário apresentado pela carga no arranque. Se este valor for muito elevado, não tem interesse aplicar um motor de indução potente (e caro) para promover o arranque um motor síncrono

potente (caso das bombas e dos compressores — $T_a \approx (0,4 \text{ a } 0,5) \cdot T_n$).

Assim, o motor de indução é utilizado nas situações em que no arranque pouco mais há que vencer do que um binário de inércia e um binário de atrito próprios da máquina síncrona.

Um caso prático conhecido é o do arranque como motor síncrono de uma máquina síncrona que irá funcionar permanentemente como compensador síncrono, em que o binário resistente de carga é apenas devido ao atrito e à ventilação da máquina síncrona.

A aplicação de um motor de indução com o rotor bobinado apresenta sobre o motor de indução com o rotor em curto-circuito duas vantagens — pode-se colocar uma resistência em série com o circuito rotórico de forma a que durante o arranque do motor síncrono o motor de indução esteja sempre a fornecer o seu binário máximo e com um melhor factor de potência; e o reóstato rotórico, desde que para isso esteja dimensionado, pode servir para controlar a velocidade de forma a obter-se exactamente a velocidade de sincronismo, quando o motor de indução tem um número de pólos magnéticos inferior ao do motor síncrono.

No entanto um motor de indução com o rotor bobinado é mais caro do que um motor de indução com o rotor em curto-circuito.

• **Motor com Colector de Lâminas**

Um motor com colector de lâminas tem a vantagem de poder trabalhar alimentado pela rede de alimentação do motor síncrono, como no caso de um motor com colector de lâminas para corrente alternada, ou o motor auxiliar pode ser alimentado por uma rede eléctrica especial, como no caso de um motor com colector de lâminas para corrente contínua.

No entanto, devido ao seu preço, esta solução para o problema do arranque do motor síncrono poderá ser encontrada apenas em instalações eléctricas antigas; na actualidade uma solução envolvendo um motor de indução com um sistema de controlo de potência seria mais interessante no seu aspecto económico.

Hoje, devido ao desaparecimento de alguns fabricantes e à diminuição da sua utilização, mesmo em Tracção Eléctrica, o motor eléctrico com colector de lâminas é caro e é de difícil obtenção no mercado (apenas por importação !). Também nas instalações eléctricas industriais desapareceram as instalações globais de distribuição em corrente contínua. Por isso, uma solução envolvendo um motor com colector de lâminas obrigaria sempre a grandes despesas de investimento e, depois, a grandes despesas com a manutenção.

No entanto este tipo de motor eléctrico apresentava algumas características electromecânicas capazes de permitirem uma fácil sincronização do motor síncrono, actuando o motor com colector de lâminas como motor auxiliar.

Depois do arranque o motor auxiliar fica ligado à máquina síncrona, contribuindo para as perdas de energia mecânica, e atravancando; poder-se-ia utilizar um sistema de embraiagem, mas nesse caso, a solução ficava mais cara!...

• **Uma Instalação**

Os modernos conceitos de gestão da água em zonas industrializadas levam à criação de aproveitamentos hidráulicos com funções de regularização de caudais de rios e de produção de energia eléctrica. As condições climatéricas locais podem influir na necessidade de armazenar água em regiões montanhosas secas a partir de regiões pluviosas de planície. A produção de energia eléctrica, com custos diferenciados em horas de ponta e em horas de vazio, cria a necessidade de bombagem de água nos aproveitamentos hidroeléctricos.

É esse o caso de uma instalação da Central de Drakensberg, na África do Sul, que além de central produtora de energia também bombeia água de uma albufeira artificial a jusante para uma

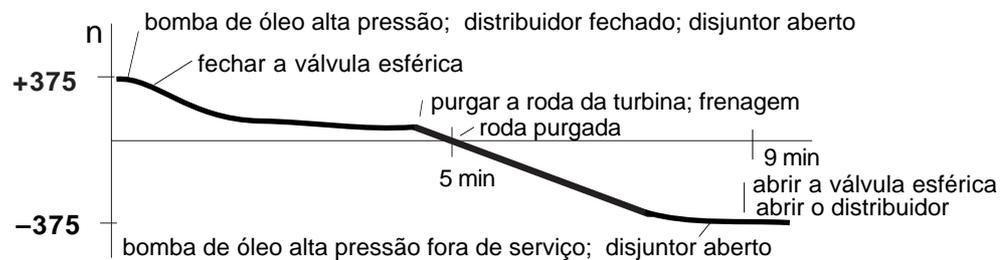
albufeira artificial a montante, separadas por uma altura de queda bruta de 390 m a 463 m (BBC; 1983). Nesta Central subterrânea existem quatro grupos de máquina síncronas acopladas a turbinas–bombas Francis reversível de um andar (250 MW).

Os parâmetros característicos do funcionamento das bombas hidráulicas são:

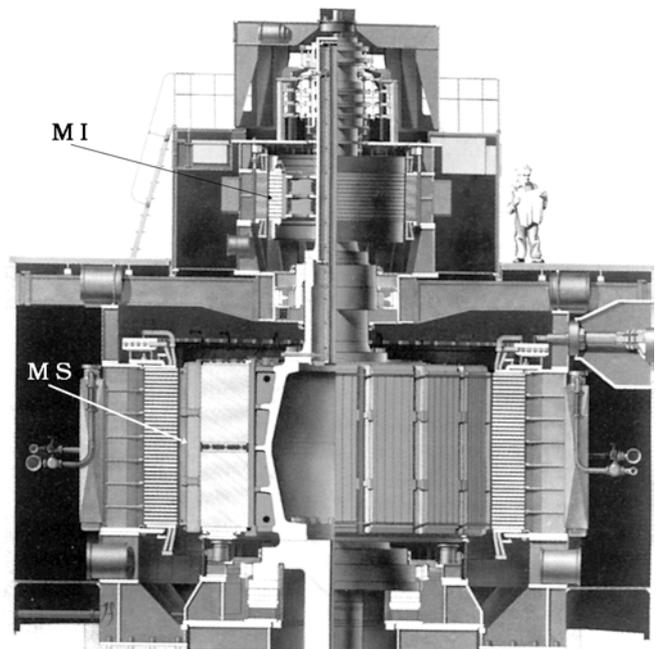
Débito (m ³ /s)	50
Altura manométrica (m)	420–473
Velocidade (rot/min)	375
Potência absorvida (MW)	280

Nesta instalação o método utilizado no arranque da máquina síncrona como motor síncrono é o – *arranque com motor auxiliar de indução com rotor bobinado*.

A máquina síncrona para funcionar como motor terá de inverter o sentido de rotação face ao sentido de funcionamento como gerador. Por isso, estando um grupo máquina síncrona turbina–bomba a funcionar como gerador há que proceder a um conjunto de operações de carácter hidromecânico para o grupo passar a funcionar como motor–bomba.



A máquina síncrona (motor–alternador, de eixo vertical, tem uma roda polar (16 pólos) sendo o circuito magnético rotórico folheado, formado por um empacotamento de chapa magnética. O enrolamento amortecedor forma uma gaiola completa.



As principais características da máquina síncrona (MS) como motor são:

Potência em regime contínuo ($\lambda = 0,98$) 280 MW Tensão nominal 11 kV
 Número de pólos 16 Velocidade 375 rot/min Frequência 50 Hz

Procurando que o funcionamento do sistema de excitação fosse rápido optou-se por um sistema de excitação estática, com rectificação comandada e regulação de tensão, alimentado nos

terminais da máquina síncrona.

O estudo do método de arranque a adoptar, atendendo à duração e frequência dos arranques, à variação da tensão admissível, ao binário de arranque e ao custo da instalação, levou à escolha de um método de arranque com motor auxiliar, com um motor para cada grupo da Central, sendo cada motor capaz de efectuar dois arranques sucessivos.

O motor auxiliar de arranque adoptado foi um motor de indução trifásico, com rotor bobinado, montado no veio da máquina síncrona no lado oposto ao ataque (ponta superior).

As principais características do motor de indução trifásico (MI) são:

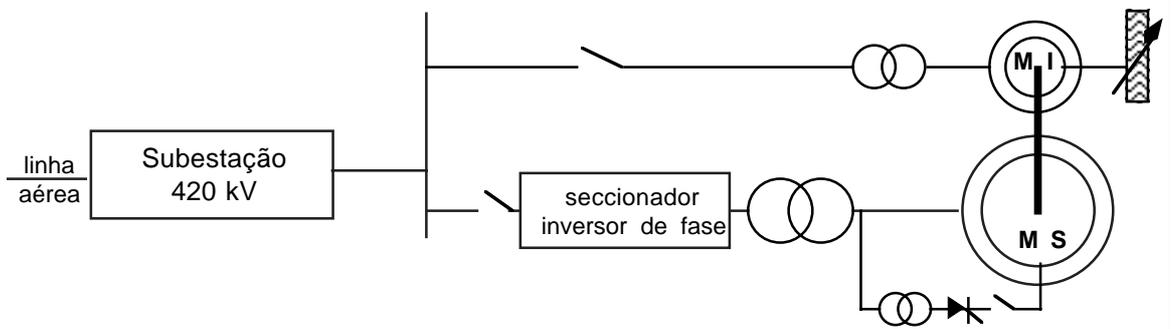
Potência em regime contínuo 16,5 MW Tensão nominal 11 kV

Número de pólos 14 Velocidade 428,6 rot/min Frequência 50 Hz

o arranque do motor de indução é feito com um reóstato rotórico de resistência líquida, o que permite manter constante o binário motor durante o arranque.

Note que para poder atingir a velocidade de sincronismo da máquina síncrona (375 rot/min) o motor auxiliar de indução tem menos dois pólos magnéticos (14), o que faz com que a sua velocidade possa ultrapassar (até 428,6 rot/min) aquele valor da velocidade de sincronismo

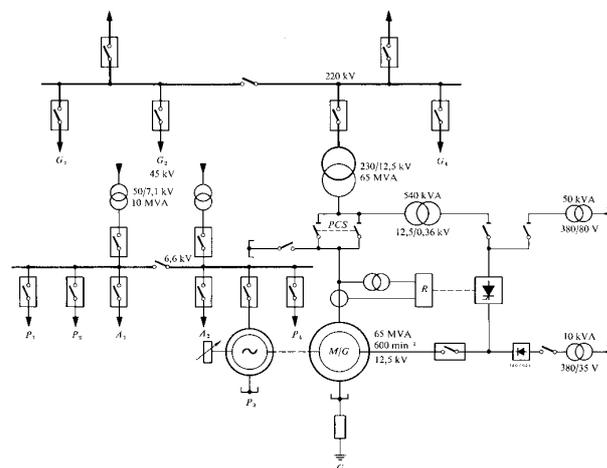
O esquema eléctrico geral da instalação para um grupo de máquinas é:



A central é explorada em regime semanal, fornecendo, diariamente, de Segunda a Sexta-feira energia de ponta durante 10 h, servindo-se do excesso de produção das centrais térmicas nas horas de vazio (10,88 h) para bombear água, e no fim de semana a água em excesso é bombeada (34,5 h) para uma albufeira de acumulação e integrada assim nos sistemas de rega.

Este regime exige a passagem ao regime de bombagem, com o respectiva frenagem da máquina síncrona (alternador), paragem e arranque com rotação em sentido contrário.

Note-se que sendo o motor auxiliar de arranque um motor de indução, ele pode funcionar como freio do grupo (com elevado momento de inércia: rotor de máquina síncrona + turbina-bomba) e nessa situação funciona como gerador assíncrono, dissipando a energia eléctrica no reóstato líquido (*de arranque*).



Ver O Aproveitamento Hidroeléctrico do Torrão 4.5

2.2 — Arranque Síncrono

No *arranque síncrono* de um motor síncrono utiliza-se uma fonte de alimentação alternada com frequência variável para provocar o lançamento do motor (aumento da velocidade até à sincronização com a rede eléctrica principal).

Durante o arranque síncrono, ou arranque a frequência variável, o motor síncrono passa por diferentes regimes num curto intervalo de tempo — regime assíncrono excitado com o rotor parado, regime assíncrono com o rotor em movimento (baixa velocidade) e regime síncrono a frequência variável (iniciando-se a baixa frequência e atingindo a velocidade de sincronismo correspondente à frequência da rede eléctrica principal).

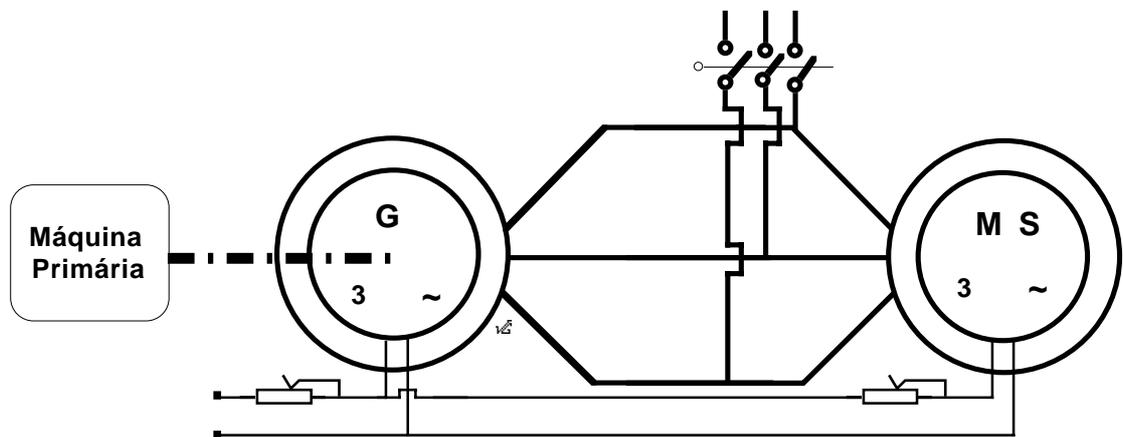
No arranque síncrono do motor síncrono pode ser utilizada como fonte de alimentação uma máquina síncrona auxiliar, ou um conversor estático de frequência.

• **Alimentação com Máquina Síncrona Auxiliar**

Quando a fonte de alimentação é uma máquina síncrona auxiliar esta máquina pode ter uma potência inferior à do motor síncrono a arrancar (cerca de $1/20$), ou pode ser uma outra máquina igual pertencente ao mesmo aproveitamento.

Note que este tipo de arranque recebe o nome na literatura internacional de "démarrage dos-à-dos", "back-to-back starting" e "arranque dorso-a-dorso ou "arranque em oposição"

Neste tipo de arranque o motor síncrono (MS) é alimentado por uma máquina síncrona auxiliar, que pode ter a sua velocidade de accionamento variável desde o repouso até a velocidade correspondente à frequência de sincronismo com a rede principal, através da acção da máquina primária (por exemplo: uma turbina com capacidade para arrancar lentamente). A excitação do motor síncrono e a excitação da máquina síncrona auxiliar estão ligadas em paralelo e alimentadas pela mesma fonte independente de tensão em corrente contínua.



Quando a tensão nominal da máquina síncrona auxiliar não coincide com a tensão nominal do motor síncrono pode-se utilizar um transformador na ligação do circuito estatórico das duas máquinas.

O arranque síncrono do motor assíncrono alimentado por uma máquina síncrona auxiliar, que é um tipo de arranque sem graves perturbações (sobreintensidades) da rede eléctrica principal, compreende as seguintes fases:

- o motor síncrono está parado; é excitado; é alimentado pela máquina síncrona auxiliar com uma tensão alternada de baixa frequência ($\approx 1\%$ de f_n);
- o motor síncrono começa a rodar em regime de funcionamento assíncrono; por acção do binário sincronizante {ver Elementos de Máquinas Eléctricas 5.7}, a baixa frequência, o motor síncrono sincroniza com a máquina síncrona auxiliar; fica a rodar a baixa

velocidade em sincronismo com a máquina síncrona auxiliar;

A maior dificuldade com este método de arranque reside na necessidade de existir um forte binário que, vencendo os binários de atrito seco, de carga e de inércia, ponha o motor síncrono em movimento. Para que o binário motor (assíncrono + relutância) no momento inicial seja máximo procura-se que tensão da máquina síncrona auxiliar seja elevada, mas admissível, e por isso aumenta-se a intensidade da corrente de excitação (sem saturar o circuito magnético).

- aumentando **lenta e suavemente** a velocidade de rotação da máquina síncrona auxiliar — aumenta-se lentamente a velocidade de rotação do motor síncrono, mas mantém-se o sincronismo das duas máquinas;
- durante a fase de aumento da velocidade (lançamento) existe a preocupação de que o fluxo magnético e a tensão nas máquinas não assumam valores inadmissíveis;
- o motor síncrono atinge a velocidade de sincronismo com a rede de alimentação principal; acerta-se o valor da tensão da máquina pelo valor da tensão da rede principal;
- verifica-se que estão correctas as condições de sincronização;
- procede-se à ligação do motor síncrono à rede eléctrica principal.

Neste método de arranque é absolutamente necessária a excitação das duas máquinas síncronas; por isso a excitação tem de ser alimentada por uma fonte de tensão em corrente contínua independente.

• **A Central Termoeléctrica do Freixo (1950)**

Uma instalação importante no seu tempo e com um carácter histórico importante era a instalação de máquinas síncronas existente na Central Térmica do Freixo, da UEP – União Eléctrica Portuguesa, situada em 1950 na margem direita do rio Douro, na freguesia de Campanhã na cidade do Porto.



A central térmica do Freixo era um central auxiliar destinada a superar as falhas da rede eléctrica alimentada pela central hidroeléctrica do Lindoso (1926). Esta rede eléctrica, que se estendia do Lindoso a Coimbra, passando por Braga e pelo Porto, não estava ligada a qualquer outra central produtora de energia eléctrica. A compensação de energia reactiva era feita por um compensador síncrono (18 Mvar) situado na Central do Freixo, que não era suficiente. Por isso tornava-se necessário utilizar os dois turboalternadores (2 x 8 MVA) da central como compensadores síncronos; sendo necessário arrancar o compensador e os alternadores como motor, sincronizá-lo com a rede da UEP e ligá-lo à rede.

A solução adoptada na central do Freixo para o arranque como motor das máquinas síncronas que iriam funcionar como compensador consistiu na utilização de uma grupo formado por uma máquina síncrona auxiliar funcionando como gerador e accionada por um motor de indução trifásico (BBC; 1950). A energia necessária à excitação da máquina era produzida por uma fonte separada de energia em corrente contínua.

O grupo auxiliar era formado por uma máquina síncrona ligada mecanicamente a um motor de indução trifásico:

máquina síncrona auxiliar — 1,25 MVA, 5,25 kV, 1000 rot/min

motor de indução trifásico (rotor bobinado) — 700 kW, 5,25 kV, 50 Hz, 1000 rot/min

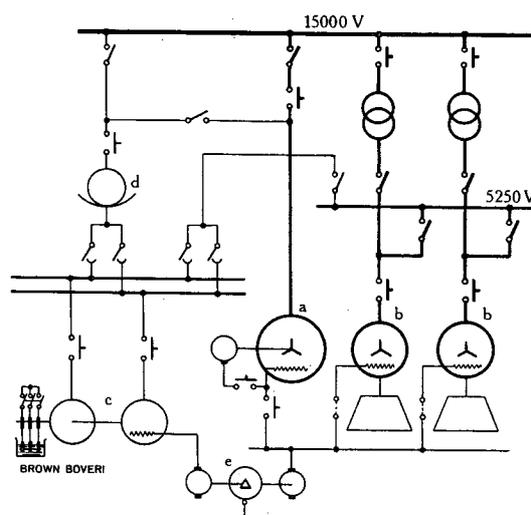
cada uma das duas máquinas síncronas, que habitualmente funcionavam com alternador, e irão arrancar como motor,

máquina síncrona (alternador)— 7,6 MW, 5,25 kV, 50 Hz, 3000 rot/min

o compensador síncrono da central que arranca como motor

máquina síncrona (compensador)— 18 Mvar, 5,25 kV, 50 Hz, 3000 rot/min

O esquema geral da instalação encontra-se representado na figura junta



Neste caso o motor de indução trifásico tinha de accionar a máquina síncrona auxiliar a velocidade variável e crescente. Isso era feito por alteração da resistência rotórica, intercalando no circuito rotórico um reóstato líquido em série com um reóstato sólido (metálico) de variação temporizada. Com esta montagem procurava-se que a aceleração do grupo fosse ajustada com precisão no início do arranque e evitava-se que o valor da intensidade da corrente fosse descontrolado. Também era mínima a sobreintensidade de corrente provocada pelo curto-circuito do circuito rotórico (última posição do reóstato) no fim do arranque.

Desde que a velocidade de sincronismo fosse atingida pela máquina em arranque (lançamento), a operação de sincronização e ligação à rede era feita por um sistema de sincronização automática rápido que provocava a ligação, quando a diferença de frequências era inferior a um certo limite ($0,01 \cdot f_n$). Eventualmente a sincronização podia ser manual, auxiliada pela leitura de um sincronoscópio.

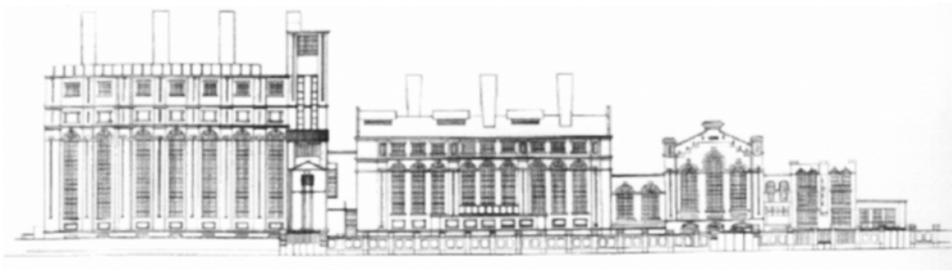
É importante atender a que esta rede eléctrica primitiva, frequentemente monoalimentada e não interligada, era susceptível de ter uma frequência ligeiramente variável em torno do valor nominal.

Da descrição desta instalação antiga é importante salientar que:

- a máquina síncrona auxiliar tem uma potência que é 7% da potência do compensador síncrono a arrancar como motor;
- o método adoptado não era influenciado pelo tipo de máquina síncrona podendo assegurar o arranque de uma máquina de pólos salientes (compensador) ou de uma máquina de indutor cilíndrico (turboalternador);
- a instalação estava dimensionada para poder assegurar três arranques seguidos.

Um outro exemplo de instalação de máquinas síncronas previstas para o arranque síncrono é o da Central Tejo da CRGE — Companhias Reunidas de Gás e Electricidade,

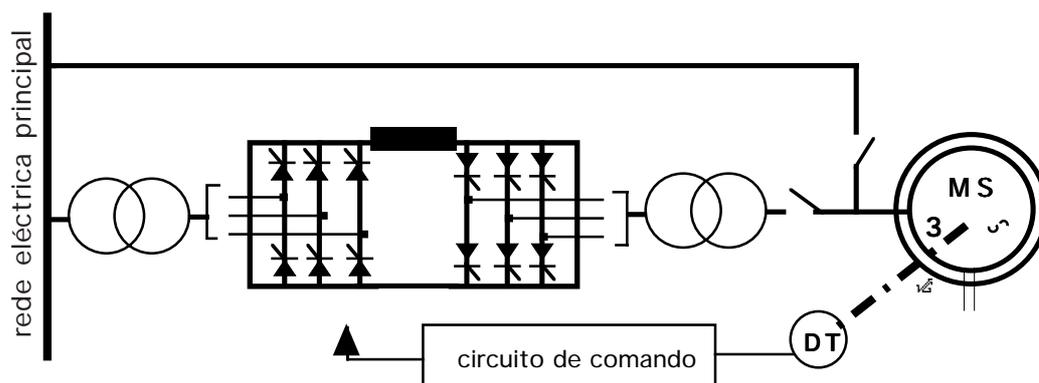
situada em Belém, Lisboa, em 1963. Um dos dois turboalternadores trifásicos (18,9 MVA; 10,5 kV; 50Hz; 3000 rot/min) arrancava como motor, para funcionar como compensador síncrono, servindo o outro turboalternador como máquina síncrona auxiliar e estando ligados pelo barramento de alta tensão. O sincronismo das duas máquinas era estabelecido entre 50 rot/min e 150 rot/min. {ver Carlos Ferrer Moncada, TÉCNICA, nº 327 e nº 328, 1963}



• **Alimentação com Conversor Estático de Frequência**

A aplicação de sistemas estáticos de conversão de frequência, realizados com mutadores desde 1936, e o desenvolvimento de elementos electrónico unidireccionais comandados (tiristor) para tensões e frequências de comutação cada vez mais elevadas, levaram à adopção de conversores estáticos de frequência no arranque síncrono de motores síncronos.

O conversor trifásico de frequência adoptado é o modelo clássico com duas pontes completas de tiristores ligadas por uma circuito intermédio de corrente contínua com bobina de filtragem.



O principal problema que existe no projecto deste conversor é que, destinando-se a trabalhar numa gama de frequências de 0 a f_n , para as frequências da ordem dos 0 a $0,1 \cdot f_n$, necessita de ter comutação forçada dos tiristores, uma vez que a amplitude da força electromotriz que se desenvolve na máquina síncrona não permite contrapolarizar os tiristores.

• **o conversor estático de frequência**

A função desempenhada pelo conversor estático de frequência consiste em converter a energia eléctrica absorvida da rede eléctrica principal em energia com uma tensão e frequência diferente, e variável, de forma a permitir o arranque síncrono do motor síncrono.

A potência nominal deste conversor está condicionada ao tipo de arranque que se pretende para o motor síncrono — quanto ao binário de carga, ao momento de inércia das partes rotativas, e ao tempo de arranque — mas é vulgar uma valor da ordem dos 3% a 5% da potência do grupo de máquinas a arrancar (para um tempo de arranque de 5 min).

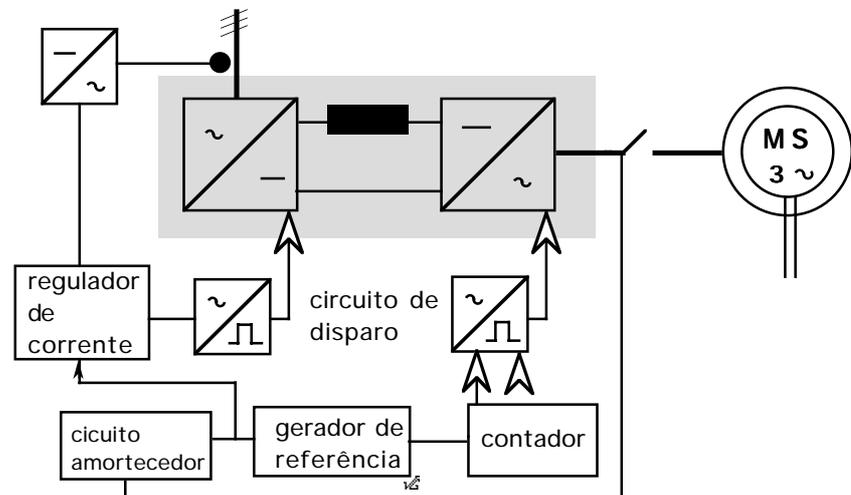
A tensão a fornecer pelo conversor estático de frequência será a tensão nominal do motor síncrono que poderá ser da ordem dos 10 kV a 25 kV, o que obriga à colocação de vários tiristores em série e levanta o problema da sua entrada em condução simultânea.

No funcionamento normal, a ponte do lado da rede trabalha como rectificador e injecta uma corrente no circuito intermédio de corrente contínua. A ponte do lado da máquina funciona como

ondulador, e a comutação da corrente é comandada pela tensão nos terminais da máquina (depende da força electromotriz gerada). Para um valor do fluxo indutor constante há proporcionalidade entre a amplitude da tensão e a velocidade de rotação e portanto, também, com a frequência do motor síncrono. Por isso quando a máquina está parada (início do arranque) a tensão nos terminais da máquina é nula e não pode actuar na contrapolarização dos tiristores; utiliza-se então um regime de impulsos emitidos em função da posição do rotor. Cada vez que um ramo do ondulador tem de comutar a corrente contínua é levada a zero pelo rectificador que está comandado pela rede (a corrente na bobina de filtragem anula-se seis vezes por ciclo do ondulador). Depois de um tempo curto (suficiente para que os tiristores recuperem o seu poder de bloqueio) um novo par de tiristores da ponte é comandado para entrar em condução.

Para que a comutação dos tiristores ocorra no momento oportuno, torna-se necessário ter uma informação sobre a posição do rotor, ou sobre a sua velocidade. Nessa função utiliza-se um sensor óptico ou um dínamo taquímetro, servindo o sinal gerado para, depois de tratado, controlar o momento de entrada em condução do tiristor adequado.

Como o funcionamento com baixa velocidade é de curta duração, pode-se utilizar um processo mais simples de promover a comutação dos tiristores até velocidades da ordem dos 10% da velocidade de sincronismo. A comutação artificial realiza-se com a actuação de um gerador de frequência de referência (6 impulsos/ciclo — um por cada comutação). Cada impulso inicia o controlo, pelo regulador de corrente, da corrente contínua em zero e durante um curto intervalo de tempo. Simultaneamente, o contador muda o estado da unidade gerador de impulsos de disparo, que bloqueia os impulsos de disparo para o último tiristor do ondulador que passou ao estado de condução; de um modo cíclico avança para a próxima posição e envia impulsos para os tiristores nos dois ramos da ponte onde circulará corrente até à comutação seguinte. Desta forma é sintetizada uma forma de onda alternada com uma frequência controlada pelo gerador de frequência de referência.



Para além das pontes de tiristores, com os seus problemas de isolamento e de arrefecimento, o conversor estático de frequência possui um conjunto de aparelhagem eléctrica de protecção e de medida que têm de ser manobrados segundo uma ordem determinada pelo projecto do conversor.

o funcionamento do conversor estático de frequência

No início da operação de arranque, o motor começa a rodar por acção de um binário assíncrono e logo deve ocorrer a sincronização do motor com o ondulador. Para isso é necessário que a energia cinética das massas rotóricas, rodando à velocidade correspondente à baixa frequência do ondulador seja igual ao menor que a energia electromecânica transferida para o rotor durante um intervalo de tempo limitado. Normalmente a sincronização ocorre sempre para as baixas frequências, desde que o binário de carga seja reduzido.

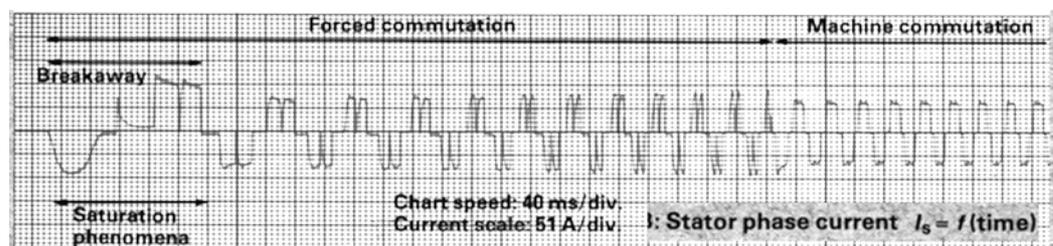
Para que o sincronismo entre o motor e o ondulator seja mantido, torna-se necessário que o aumento da frequência seja lento e suave; a experiência demonstra que um valor para a variação da frequência da ordem dos 0,05 Hz/s até 0,2 Hz/s é razoável.

Nesta fase inicial o conversor estático de frequência tem de funcionar com comutação forçada, existindo diversos tipos de circuitos para promover esse função, uma vez que a comutação natural dos tiristores não pode ocorrer devido ao valor baixo da tensão (essencialmente da força electromotriz) nos terminais do motor síncrono. A máquina síncrona está com uma excitação baixa, correspondente a 25% da excitação à plena carga, de forma a que não existe uma tensão muito elevada nos terminais do ondulator quando a máquina atingir a velocidade máxima para esta fase ($\approx 10\%$ da velocidade de sincronismo).

Acima da velocidade correspondente a 10% da frequência de sincronismo, a tensão nos terminais do motor (essencialmente dependente da força electromotriz) já tem um valor suficiente para promover a comutação dos tiristores. Nesta situação a excitação do motor síncrono é a correspondente à excitação em carga da máquina.

Convém salientar aqui que o ondulator não gera uma forma de onda sinusoidal. Admitindo a linearidade do circuito eléctrico (!) poder-se-ia decompor essa forma de onda nos seus termos harmónicos e verificar o comportamento como motor de indução e como motor de relutância da estrutura do motor síncrono alimentado por essa forma de onda distorcida. Por análise da expressão do binário de indução para esta máquina, e mediante algumas simplificações conclui-se que $|T_H| < 0,001 \cdot T$. Assim, o binário correspondente aos harmónicos de corrente pode ser desprezado.

Rodando o motor à velocidade de sincronismo, depois de um aumento de velocidade suave e sem qualquer alteração brusca do regime de funcionamento, é possível estabelecer as condições de sincronismo para a amplitude da tensão (actuando na excitação) e realizar o paralelo do motor com a rede eléctrica principal.



vantagens

A utilização de um conversor estático de frequência no arranque síncrono de um motor síncrono, tem as seguintes vantagens:

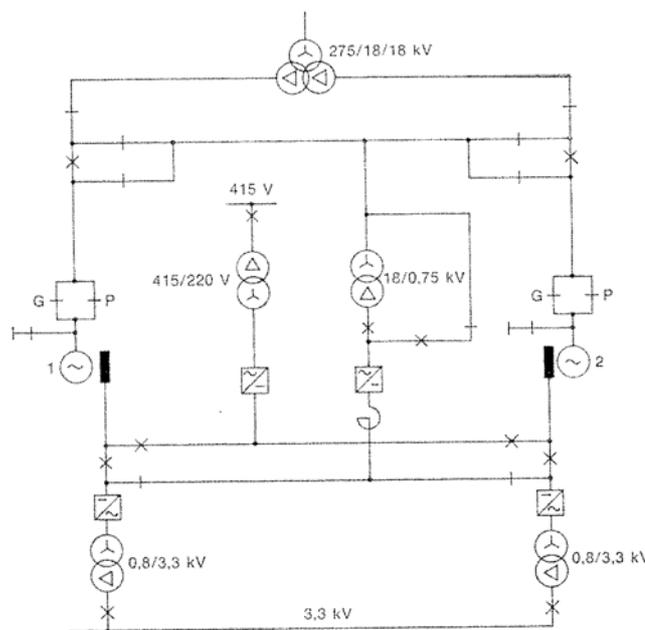
1. O consumo de energia está limitado durante o arranque e é apenas uma parte do consumo de energia nominal do motor síncrono.
2. Como o arranque é síncrono não são importantes os binários oscilatórios ou os binários harmónicos (que surgem no arranque assíncrono). O arranque é suave, o que reduz os esforços mecânicos sobre os componentes ligados à sua parte rotórica.
3. O binário de arranque, e a corrente de arranque, podem tornar-se independentes de outros parâmetros dentro dos limites permitidos pela aceleração mínima ou pelo tempo de arranque.
4. O sistema é estático, o que aumenta a fiabilidade, e tem manutenção reduzida.
5. Um único sistema de arranque com conversor estático de frequência pode ser utilizado para o arranque de vários grupos de máquinas numa instalação (aproveitamento), podendo ser ligado a uma rede de baixa tensão.
6. O conversor estático de frequência permite a alteração do sentido do binário por

alteração da polaridade no circuito intermédio de corrente contínua, podendo funcionar também na frenagem do motor síncrono.

uma instalação

Existem centrais hidroeléctricas em que estão instalados apenas dois grupos de máquinas. Eventualmente os grupos podem ser reversíveis: é o caso da central de Foyers, na margem do Loch Ness, Escócia que possui dos grupos reversíveis motor/alternador, para possibilitar a bombagem de água do Loch Ness para um lago a cota superior o Loch Mhor (≈ 175 m).

O esquema geral da instalação encontra-se representado na figura junta



Nesta central é possível efectuar o arranque de uma máquina eléctrica como motor síncrono, em arranque síncrono alimentado pela outra máquina da central funcionando como alternador, mas existe também a possibilidade de utilizar um conversor estático de frequência no arranque síncrono de cada um dos dois motores-alternadores (ASEA; 1974/76).

As características das máquinas eléctricas são:

máquina síncrona (motor)– 176 MW, 18 kV, 50 Hz, 273 rot/min

Neste caso o conversor foi projectado atendendo às necessidades específicas da Central e por isso as pontes rectificadoras são utilizadas também no sistema de excitação estática das máquinas síncronas. As pontes do conversor têm seis elementos de comutação, formado cada um por dois tiristores em série por braço. Durante ao arranque a intensidade da corrente contínua no circuito intermédio atinge os 5250 A, e está distribuída por oito pontes em paralelo no rectificador e por nove pontes em paralelo no ondulador (devido ao funcionamento em baixa frequência). A bobina de filtragem tem um núcleo ferromagnético e está imersa em óleo.

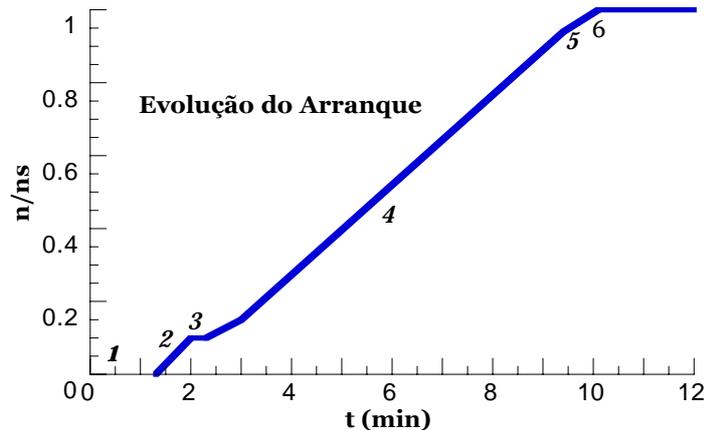
No início do arranque o binário motor está definido pelo momento de inércia das massas em movimento e pela aceleração pretendida, a que tem de se juntar o binário resistente devido às perdas do motor síncrono e da bomba. O binário de atrito está reduzido pela injeção de óleo lubrificante sob pressão nos mancais do grupo.

Durante os momentos iniciais (velocidade muito baixa) a roda da turbina-bomba está submersa, o que faz com que existe um binário resistente que aumenta (\approx quadrática) com a velocidade de rotação que está a aumentar. Por isso, há que desafogar a roda da turbina-bomba com ar comprimido, a cerca de 15% da velocidade nominal. A partir dessa altura diminui substancialmente o binário resistente.

Deveria ser possível desafogar a roda da turbina-bomba no início do arranque, mas devido às fugas do ar comprimido a baixa velocidade, e o conseqüente esforço sobre o

turbocompressor, tal não é feito.

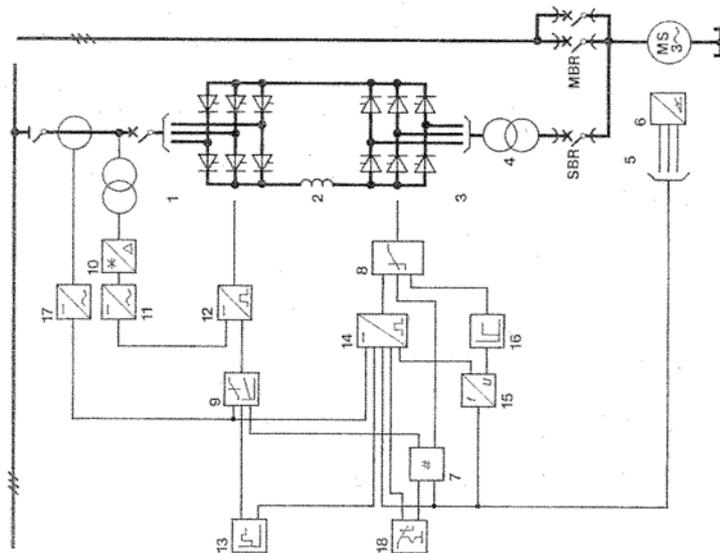
A potência máxima requerida ao conversor no arranque é de 4,3 MW { $4,3/176 \approx 52,4\%$ }.



1 – preparação do arranque; 2 – aceleração com comutação forçada; 3 – comutação pela carga; 4 – aceleração com comutação pela carga; 5 – preparação da sincronização; 6 – sincronização

O sistema de arranque síncrono com conversor de frequência está previsto, quanto ao aquecimento, para três arranques seguidos.

Devido à complexidade das operações sequenciais a efectuar para passar do regime de turbina/alternador para o regime bomba/motor, e vice-versa, existe um sistema de controlo electrónico sequencial que, baseando-se em informação sobre o estado dos elementos da instalação, comanda os grupos completos (eléctrico e hidromecânico) nas operações de arranque, funcionamento e paragem, ou de avaria.



Em Portugal o primeiro sistema de arranque de máquina síncrona com conversor estático de frequência foi feito na Central Térmica de Caniços (3 x 15 MVA; 1929, 1931, 1935) na margem direita do rio Ave. O conversor estático de frequência utilizava mutadores — elementos monoanódicos comandados pela grelha — e a máquina síncrona era um turboalternador de 15 MVA quando funcionava como compensador síncrono.

Actualmente no aproveitamento hidroeléctrico da Aguieira (rio Mondego) pode ser utilizado um sistema de arranque de máquina síncrona com conversor estático de frequência

2.3 — Arranque Assíncrono

No arranque assíncrono é aproveitado o comportamento da estrutura do motor síncrono funcionando da mesma forma que um motor de indução (motor assíncrono). É um tipo de *auto-arranque* porque na própria máquina síncrona se desenvolve o binário motor necessário à movimentação do rotor até se dar a sincronização de fases com a rede de alimentação.

Na expressão do binário electromotor de um motor síncrono existe uma componente resultante de fenómenos iguais aos do princípio de funcionamento do motor de indução trifásico — *binário assíncrono*:

$$T_{ela} = (3 \cdot p / 2) \cdot (M_{aKd} \cdot i_{Kd} \cdot i_q - M_{aKq} \cdot i_{Kq} \cdot i_d)$$

Para este binário contribui o efeito de circuito fechado dos enrolamentos amortecedores rotóricos e as correntes eléctricas que circulam nesses enrolamentos fechados devido às forças electromotrizas induzidas pelo campo girante criado pelo enrolamento estatórico polifásico alimentado pela rede eléctrica. Também poderão contribuir para o binário assíncrono as correntes de Foucault que se desenvolvem por indução nas massas metálicas polares, e as correntes eléctricas que se desenvolvem por indução do campo girante de reacção do induzido no circuito indutor quando está fechado e roda a uma velocidade diferente da velocidade de sincronismo.

Estas últimas situações — correntes de Foucault na massa metálica e corrente induzida no circuito indutor — não foram consideradas no modelo de máquina síncrona desenvolvido, devido às condições de estudo adoptadas; por isso não aparecem na expressão do binário assíncrono.

É importante notar que o andamento do binário assíncrono durante o arranque é favorável a um bom arranque da máquina síncrona. Quando a máquina está parada e é ligada à rede o deslizamento nesse momento é unitário ($s = 1$) e o binário desenvolvido no momento de arranque é também *muito elevado* podendo vencer as resistências devidas ao atrito e à movimentação da carga mecânica.

No entanto se durante o arranque o circuito indutor estiver aberto, pode surgir nos seus terminais uma sobretensão perigosa (principalmente para os componentes electrónicos que estiverem intercalados nesse circuito); por isso utiliza-se, normalmente, uma resistência 5 a 10 vezes mais elevada do que a resistência do circuito indutor, intercalada nos terminais deste circuito, durante o arranque R_{si} .

Ressalta daqui uma regra de segurança na execução da montagem eléctrica para esta manobra:

⊗ *há que curto-circuitar os terminais do circuito indutor da máquina síncrona com uma resistência eléctrica R_{si} de valor elevado*

Para além do binário assíncrono durante o arranque de um motor síncrono pode surgir um outro binário, resultante da assimetria eléctrica e magnética da roda polar — é o *binário oscilatório*.

assimetria eléctrica do rotor

Enquanto que no motor de indução o rotor é construído respeitando a simetria em torno do eixo do veio da máquina (simetria axial), numa roda polar não existe simetria magnética mas pode existir, também, uma assimetria eléctrica acentuada.

Ver Elementos de Máquinas Eléctricas 5.4 e 5.5.

No caso de um roda polar com pólos maciços sem circuitos amortecedores existe assimetria magnética (segundo o eixo directo e segundo o eixo em quadratura) mas também existe assimetria eléctrica, porque só existe um circuito eléctrico (enrolamento indutor) segundo o eixo directo. Os micro-circuitos eléctricos formados no material ferromagnético maciço dos pólos (sede das

correntes de Foucault) distribuem-se de uma forma assimétrica pela massa polar e dependem da heterogeneidade do seu material.

Quando a máquina possui pólos maciços e um circuito amortecedor completo, já é menor a assimetria eléctrica. O circuito amortecedor é um circuito polifásico redutível a duas bobinas equivalentes cada uma actuando segundo um eixo de simetria magnética do rotor da máquina.

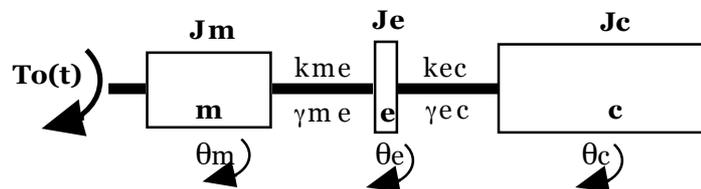


Se a máquina possuir pólos folheados e um circuito amortecedor completo já a assimetria eléctrica poderá ser menor, porque para além do circuito eléctrico indutor desaparece a representação das correntes de Foucault, embora ainda se considere a existência de circuitos eléctricos equivalentes aos enrolamentos amortecedores segundo os dois eixos, o que torna maior o equilíbrio da importância dos circuitos eléctricos segundo os eixos magnéticos.

*Este desequilíbrio eléctrico não sucede no motor de indução de construção normal em que o circuito rotórico é equilibrado e se distribui por toda a periferia do rotor: e por construção tem tantos pólos e pode-se considerar que tem tantas fases quanto o circuito estatórico (máquina eléctrica n-n). Por isso no motor de indução normal não existe binário oscilatório durante o funcionamento,
 Conclusão: se num motor de indução de construção normal surgir um binário oscilatório o motor está mal construído!*

O binário oscilatório que surge durante o arranque do motor síncrono pode ser perigoso. Este binário pode ser grande mesmo nas máquinas possuindo um rotor com circuito magnético simétrico e circuito eléctrico assimétrico. O binário oscilatório, com uma pulsação dupla da pulsação das grandezas eléctricas rotóricas, torna-se perigoso porque pode excitar ressonâncias de torção no veio do sistema de accionamento electromecânico.

Um grupo mecânico constituído por um motor síncrono uma caixa de engrenagens e um compressor (ou uma bomba hidráulica) constituem um sistema de torção com três massas que possui uma frequência própria de vibração abaixo da frequência de rotação nominal.

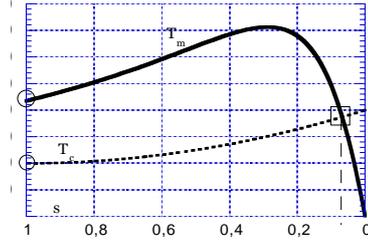


Um fenómeno de ressonância que ocorra neste sistema pode ter consequências graves.

• **sincronização**

Durante a fase de arranque, durante a passagem da velocidade nula até à velocidade próxima da velocidade de sincronismo no motor síncrono, em arranque assíncrono, existe a influência dos seguintes binários: binário de carga + binário de inércia + binário assíncrono. O binário assíncrono tem diversos binários componentes entre os quais o binário oscilatório (eventualmente, um binário de relutância, por exemplo).

Sob a acção dos diferentes binários, o motor síncrono durante o arranque assíncrono, aumenta a sua velocidade desde a velocidade nula até a uma valor limite da velocidade, para o qual o deslizamento depende das características da máquina como motor de indução e do binário de carga. Este baixo deslizamento corresponde ao ponto em que a característica mecânica do binário motor intercepta a característica mecânica do binário de carga.



O deslizamento limite é normalmente baixo e, se for aplicada uma tensão contínua ao circuito indutor (se for excitado), o motor pode “saltar” (“pull into”) para o sincronismo com a rede de alimentação — por acção de um *binário sincronizante* — e continuar a funcionar como um motor síncrono alimentado pela rede eléctrica.

As condições para que ocorra o salto para o sincronismo dependem de um conjunto de factores que podem ser apreciados.

Considerando os diferentes binários que actuam no motor síncrono durante o arranque assíncrono pode-se escrever uma equação mecânica:

$$T_a = T_c + T_J$$

mas no momento em que é ligada a excitação vai surgir um binário síncrono, que, em regime permanente sinusoidal simétrico, é uma função conhecida do ângulo de carga

$$T_s(\delta) = \Gamma \cdot \text{sen}(\delta) + \Lambda \cdot \text{sen}(2\delta)$$

A expressão do binário electromotor para uma motor síncrono trifásico com pólos salientes em regime permanente sinusoidal simétrico é:

$$T_{em} = \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \cdot \left(\frac{U \cdot E_o}{X_d} \text{sen} \delta + \left(\frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \right) \cdot U^2 \text{sen} 2\delta \right)$$

e cada um dos binários electromecânicos pode ser representado como função do ângulo de carga δ , resultando a equação mecânica numa equação diferencial não linear com coeficientes constantes.

$$T_a(\delta) + T_s(\delta) = T_c + T_J$$

A resolução, gráfica ou numérica, desta equação permite elaborar algumas considerações importantes. As soluções mostram que o momento em que se aplica a tensão ao circuito indutor — *o momento de excitação* — definido pelo valor do ângulo de carga δ é de grande importância.

O ângulo de carga δ pode ser considerado como o ângulo entre o eixo magnético do campo estatórico e o eixo magnético do campo rotórico

($\delta = 0$) Quando o momento de excitação ocorre para um valor do ângulo de carga nulo $\delta = 0$, o binário síncrono tem um valor instantâneo nulo, e o motor apenas é accionado pelo binário assíncrono, que faz deslizar o rotor relativamente ao estator e que faz aumentar o ângulo de carga, aumentando, também, o binário síncrono o que provoca a aceleração do rotor. Por acção do binário síncrono o deslizamento diminui e a máquina tende a saltar para o sincronismo.

($-\pi/2 \leq \delta \leq \pi/2$) ocorre uma situação análoga à anterior porque para estes valores do ângulo de carga o binário síncrono tende a acelerar o rotor.

($\pi/2 \leq \delta \leq 3\pi/2$) o binário síncrono tende a desacelerar o rotor; o momento mais desfavorável é para o ângulo de carga $\delta = \pi$.

Assim,

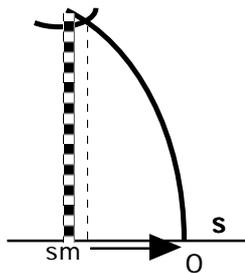
- o melhor valor do ângulo de carga para definição do momento de ligação do circuito de excitação, corresponde ao momento em que é máximo o fluxo totalizado do circuito indutor — quando a polaridade deste fluxo totalizado corresponde à do campo resultante da excitação— ou quando a corrente eléctrica de excitação induzida (alternada) se anula

indo de negativa para positiva. O ângulo de carga δ correspondente é de 15° a 30° na região de funcionamento como motor.

- o pior ângulo para sincronização ocorre na região dos 110° a 120° (funcionamento como motor).

Como resultado deste estudo verifica-se que o binário assíncrono pode-se considerar independente do ângulo de carga, o binário síncrono varia com o ângulo de carga, o binário resultante será pulsante, acelerando ou desacelerando o rotor conforme o ângulo de carga no momento de ligação.

Se no instante inicial o aumento do deslizamento for muito grande, o binário resultante acelerador pode não ser capaz de acelerar o rotor até à velocidade de sincronismo, e a máquina não sincronizará.



A acção de sincronização torna-se muito importante e convém analisar a expressão do valor máximo do deslizamento a partir do qual o motor síncrono pode sincronizar com a rede eléctrica com determinados valores de inércia e para determinada situação de excitação.

Obtém-se assim o deslizamento máximo para um determinado binário, a partir de alguns parâmetros da máquina síncrona (J — momento de inércia, γ — razão síncrona de sobrecarga, P — capacidade)

$$s_{\max} \leq \frac{k\gamma}{\omega_s} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot P}{J \cdot f}}$$

O deslizamento máximo não pode ser reduzido abaixo de um determinado valor ($s = 0,04$) mas a fórmula permite concluir que — **a sincronização é mais fácil** — quando:

- ❖ a inércia (J) do sistema é pequena;
- ❖ a velocidade de sincronismo ω_s é baixa, ou o número de pólos é elevado;
- ❖ quanto maior for a excitação, maior é a razão de sobrecarga (T_m/T_n), mais facilmente a máquina sincronizará.

Verifica-se, através desta fórmula aproximada, que o binário de carga não afecta (directamente) a sincronização. **O que afecta é o momento de inércia da carga.** Mas na realidade o binário de carga afecta o valor do deslizamento com que a máquina roda no momento em que a excitação é ligada.

• **corrente de excitação**

O valor da intensidade da corrente de excitação da máquina síncrona aplicada durante a sincronização afecta a intensidade de corrente de carga, a intensidade da corrente absorvida da rede eléctrica.

Está-se a considerar que o sistema indutor não contém díodos no seu circuito: Quando existem díodos no circuito do indutor — excitação electrónica ou excitação sem escovas — existem outros fenómenos durante a ligação da excitação no arranque assíncrono. Ver Díodos no Circuito Indutor 5.6

Quando é aplicada a tensão ao circuito indutor da máquina síncrona, em processo de arranque, o carácter indutivo do circuito indutor impõe uma constante de tempo que não permite a obtenção instantânea da corrente final; por isso o campo magnético indutor demora a atingir a sua distribuição final, e entretanto o motor salta para o sincronismo. A corrente de carga, absorvida pelo motor, decai suavemente desde o valor necessário ao motor para rodar como motor assíncrono, até ao valor em regime síncrono permanente. Este valor da corrente de carga depende da corrente de excitação aplicada: tem o seu valor mínimo quando não é aplicada a corrente de excitação em vazio e o binário de carga é pequeno.

A situação recomendada para a sincronização é um valor da corrente de excitação igual à corrente de excitação em vazio, estando o motor síncrono com uma carga mecânica pequena.

- **energia térmica**

No arranque assíncrono da máquina síncrona é importante considerar a energia térmica libertada, por efeito Joule nos diversos fenómenos eléctricos que ocorrem na roda polar: correntes de Foucault nas partes maciças, correntes eléctricas nos enrolamentos amortecedores, corrente eléctrica no circuito auxiliar de arranque (se existir !), corrente eléctrica no circuito indutor. O balanço térmico final pode ser importante na escolha do tipo de pólos, maciços ou folheados, na fase de projecto de um motor síncrono {principalmente nas aplicações para potência elevada}.

Perante as dificuldades construtivas de provocar o arrefecimento do enrolamento amortecedor por meio da circulação de água (refrigerado a água), prefere-se a escolha do tipo de pólos — maciços ou folheados — atendendo a que os pólos maciços podem absorver o calor produzido (maior constante térmica de tempo devido a uma maior massa metálica) durante o arranque e por isso impedir um crescimento rápido da temperatura. Refere-se o exemplo de uma máquina de 230 MVA construída com pólos maciços.

- **o arranque**

O arranque assíncrono do motor síncrono realiza-se com máquinas das mais diversas potências, e ao longo do tempo foram muitas as instalações executadas e foram sendo incorporados os conhecimentos entretanto adquiridos.

- **o arranque directo**

O arranque directo consiste essencialmente num arranque assíncrono à tensão nominal, mas nesta designação também podem estar incluídos outros métodos em que por mera alteração da ligação dos enrolamentos se consegue aplicar uma tensão menor do que a tensão nominal; é o caso do arranque estrela-triângulo, arranque série-paralelo, e arranque com enrolamento parcial.

Numa grande rede pode utilizar-se a ligação do motor síncrono à rede à tensão nominal do motor,

- quando o momento de inércia do grupo de máquinas é pequeno, o aumento de velocidade sem binário resistente é tão rápido que não se pode considerar que se chegue a estabelecer um binário assíncrono permanente; mas nesse caso é grande a acção de torção mecânica a que o veio do sistema é submetido.
- nas grandes instalações, em que existe um binário resistente elevado, o aumento de velocidade não é tão rápido, mas a corrente de carga no arranque e o binário electromotor são fortemente diminuídos devido à reactância suplementar no circuito estatórico, correspondentes aos condutores de ligação e ao transformador.
- nesta situação a corrente de arranque é muito elevada, o que condiciona os aspectos construtivos dos enrolamentos estatóricos e rotóricos, sobretudo quando a situação de arranque é frequente.

Perante os problemas causados pelo arranque directo — **sobreintensidade de corrente inadmissível, esforços mecânicos no veio** — procura-se sempre reduzir a tensão aplicada. A forma mais simples envolve apenas a alteração da ligação dos enrolamentos estatóricos do motor síncrono.

Arranque estrela-triângulo — quando o motor tem ambos os terminais dos enrolamentos de fase acessíveis e está desenhado para uma operação normal com as fases ligadas em triângulo, então esses enrolamentos de fase podem ser ligados em estrela durante a primeira parte do processo de arranque.

Este método é somente utilizado para máquinas de pequena potência associadas a uma carga com uma inércia razoável, porque no momento em que se dá a comutação da ligação dos enrolamentos de estrela para triângulo existe um intervalo de tempo em que o corcuito do induzido não é alimentado e a máquina desacelera, aumentando o deslizamento e podendo criar uma sobreintensidade importante no momento da comutação; tal sobreintensidade pode ser

superior ao pico de corrente inicial.

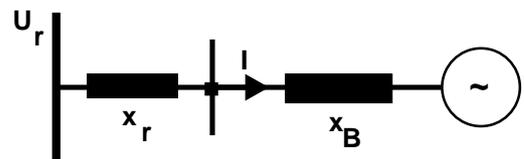
Arranque série-paralelo — quando o motor tem um enrolamento do circuito induzido formado por dois sub-enrolamentos que no funcionamento normal estão ligados em paralelo (duas vias), pode-se reduzir o pico de corrente inicial utilizando uma ligação em série dos sub-enrolamentos durante o arranque. Claro que o binário de arranque também virá reduzido, e continua a existir o inconveniente de existir a comutação dos enrolamentos com um fenómeno transitório (sobreintensidade) associado.

Arranque com enrolamento parcial — quando o motor é pequeno ou médio, e lento, pode-se utilizar apenas parte do enrolamento do circuito do induzido durante o arranque; desta forma aumenta-se artificialmente a reactância apresentada pelo enrolamento no arranque e diminui-se a corrente de arranque (50% a 80%). O binário de arranque também diminui (45% a 70%) face ao binário à tensão nominal e com o enrolamento completo. Este método de arranque exige que o projecto do enrolamento seja cuidado para que apresente dois ou mais circuitos em paralelo, repartidos de forma a criarem-se zonas activas alternando com zonas desactivadas na periferia do entreferro. Esta repartição assimétrica do campo traduz-se por uma forma de onda distorcida, com harmónicos susceptíveis de criarem binários com diferentes frequências (binários harmónicos). Este método apresenta vantagem sobre os métodos anteriores de o motor nunca deixar de ser alimentado.

o arranque com meios auxiliares

Para evitar as sobreintensidade elevadas para a rede eléctrica e para se obter um arranque suave procura-se reduzir a tensão de alimentação aplicada aos enrolamentos do motor, com o auxílio de equipamento auxiliar, aumentando-se artificialmente a impedância da ligada à rede de alimentação. Existem fundamentalmente dois métodos simples para obter esta situação: colocar uma impedância em série com circuito do induzido do motor, ou alimentar o motor através de um transformador (ou autotransformador).

Arranque com bobina de arranque — o elemento de circuito eléctrico a colocar em série com o motor será uma reactância (bobina) porque uma resistência teria de dissipar uma elevada quantidade de calor. Normalmente utilizam-se bobinas trifásicas equilibradas.



Utilizando uma bobina de arranque a corrente absorvida da rede é igual à corrente absorvida pela máquina

Com uma bobina de arranque, começa-se por levar o motor, como motor de indução até à velocidade próxima do sincronismo — como está a bobina de arranque em série com o motor a corrente de arranque vem limitada — e depois excita-se o motor síncrono, o binário sincronizante fará o motor saltar para o sincronismo.

Depois do arranque, curto-circuitam-se os terminais da bobina de arranque.

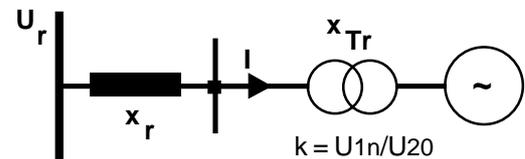
Quando o binário sincronizante requerido é pequeno utiliza-se um valor de corrente de excitação correspondente à excitação em vazio. Quando o binário sincronizante requerido é grande aplica-se uma intensidade de corrente de excitação correspondente à plena carga.

Este método apresenta a dificuldade de limitando (fortemente) a corrente de arranque, limita o binário de arranque a um valor fixo, o que pode impedir o arranque do motor síncrono com um binário de atrito e um binário de carga elevados.

Arranque com transformador — neste método de arranque o motor é alimentado durante a

fase de arranque por um transformador abaixador, com razão de transformação k . Como a impedância do transformador vista do lado primário é aumentada do quadrado da razão de transformação, é reduzida a corrente absorvida da rede eléctrica; para isso alimenta-se o motor síncrono com um transformador abaixador durante o arranque e depois o motor é ligado directamente à rede eléctrica

Como o transformador está ligado só durante o arranque o seu rendimento não é importante, frequentemente utiliza-se um autotransformador.

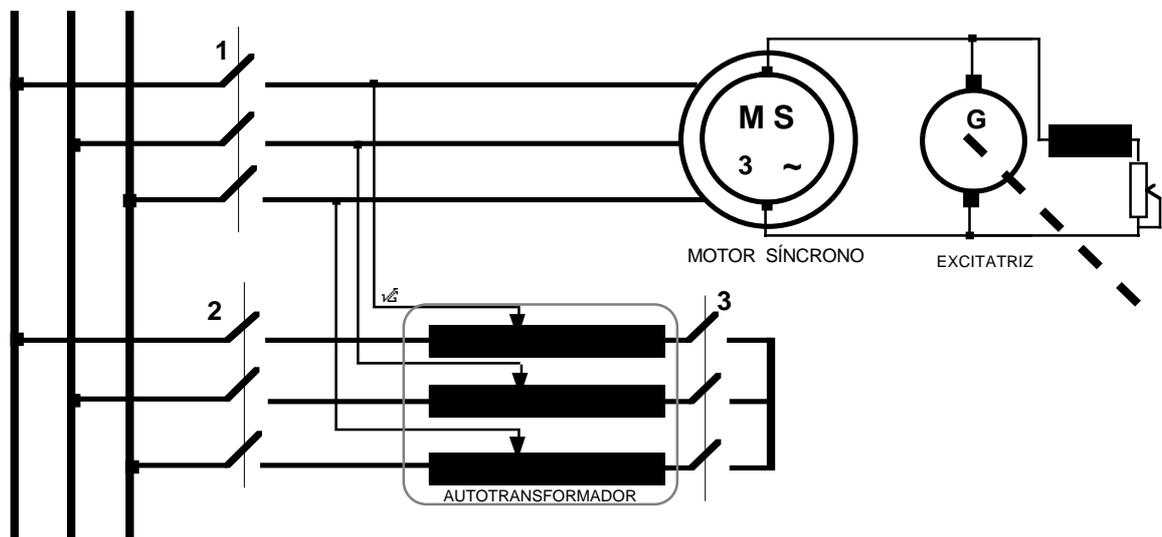


Utilizando um transformador (abaixador) no arranque a corrente absorvida da rede é inferior à corrente absorvida pela máquina — $I = I_M/k$

Apenas em Laboratório se utiliza um autotransformador com razão de transformação variável

A tendendo à razão de transformação $k = U_{1n}/U_{20}$, para a mesma corrente na rede I , a corrente absorvida pela máquina I_M é k vezes maior quando se aplica um transformador abaixador no arranque do que quando se aplica uma bobina de arranque; por isso o binário de arranque é neste caso maior, sendo a aceleração da máquina maior e sendo o tempo de arranque menor.

Na fase de sincronização, depois de o motor ter sido levado a uma velocidade perto do sincronismo com auxílio da sua alimentação a tensão reduzida por um transformador (autotransformador) é necessário comutar a alimentação através do transformador para uma ligação directa à rede eléctrica. São possíveis duas sequências de operações:



comutação com circuito aberto — nesta sequência de operações desliga-se o motor do transformador e depois liga-se à rede eléctrica à tensão nominal. O motor pode estar já sincronizado com a rede eléctrica, mas durante a transição o motor está completamente desligado de qualquer rede, e estando excitado, — *na realidade é um gerador síncrono dessincronizado da rede eléctrica* — e, dependendo do momento de inércia da parte rotórica, pode-se dar uma alteração da velocidade tal (que o afaste dos valores de sincronização) e que quando se procede à ligação à rede eléctrica à tensão nominal ocorre uma sobreintensidade perigosa superior à corrente absorvida durante

o período de arranque em que esteve alimentado pelo transformador.

Atendendo ao esquema acima figurado, a sequência de operações seria: fechar o interruptor 2 com o interruptor 1 aberto e o interruptor 3 fechado (2F; 1A; 3F); quando o motor atinge a velocidade, abre-se o interruptor 2 que provoca a abertura do interruptor 3 e o fecho do interruptor 1 (2A; 3A; 1F)

Este processo de ligação — **comutação com circuito aberto** — só deve ser utilizado quando o binário de carga é baixo e o momento de inércia das partes em movimento rotativo é elevado, como no caso de uma motor accionando um gerador.

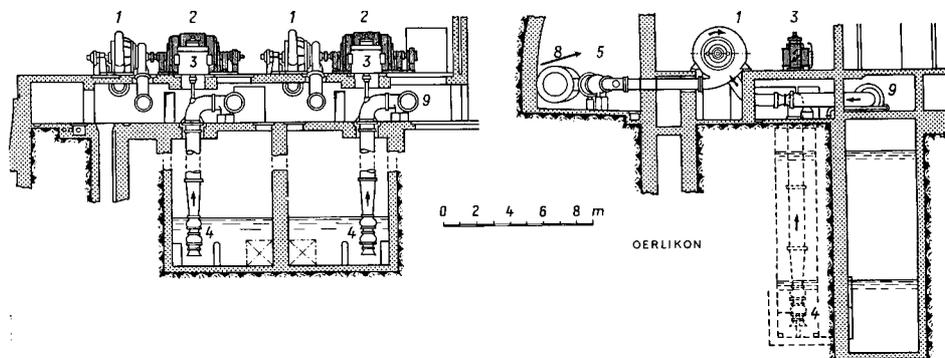
comutação com circuito fechado — nesta sequência de operações o motor é sincronizado ainda com tensão reduzida, e depois é-lhe retirada a alimentação pelo transformador passando a ser feita directamente da rede eléctrica, sem que o motor seja desligado da alimentação.

Atendendo ao esquema acima figurado, a sequência de operações seria: fechar o interruptor 2 com o interruptor 1 aberto e o interruptor 3 aberto (2F; 1A; 3A); quando o motor atinge a velocidade, abre-se o interruptor 3 (3A) continuando o motor alimentado a tensão reduzida; fecha-se o interruptor 1 que cuto-circuita o circuito que contém o interruptor 2 (3A; 1F; 2F-2A)

Nestas montagens é importante analisar o poder de corte (e o preço) dos interruptores a utilizar — caso do interruptor 1.

• **uma instalação**

Descreve-se aqui uma instalação de bombagem para acumulação secundária de água destinada a compensar as pontas de carga na produção hidroeléctrica de energia, realizada em meados do século vinte (OERLIKON; 1957).



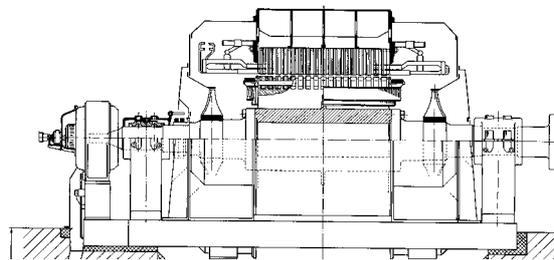
A estação de bombagem eleva a água para uma albufeira de acumulação durante as horas de vazio, sendo a água turbinada nas horas de ponta numa cascata de aproveitamentos hidroeléctricos. Desta forma uma elevação de água de 400 m pode ser aproveitada numa queda bruta global de 1200 m. Na bombagem são utilizados dois grupo de bombagem com bombas de alta pressão (1) e dois andares, accionadas por um motor síncrono (2) de 12 MW, a que se encontram ligadas rigidamente.

Débito (l/s)	2030
Altura manométrica (m)	410
Velocidade (rot/min)	1000
Potência absorvida (MW)	9,6

Nesta central existem dois grupos turbina-alternador independentes do sistema de bombagem. Existem ainda bombas de alimentação (3,4), accionadas por motores de indução verticais (3), para encher de água o circuito hidráulico (9,1,5,8) no início da operação de bombagem.

Nesta instalação o método utilizado no arranque do motor síncrono é o — *arranque assíncrono com tensão reduzida por autotransformador de arranque*.

O motor síncrono, de eixo horizontal, tem uma roda polar (6 pólos) sendo as expansões polares folheadas formadas por um empacotamento de chapa magnética. O enrolamento amortecedor é muito robusto, para poder suportar a difíceis condições do arranque.



As principais características do motor são:

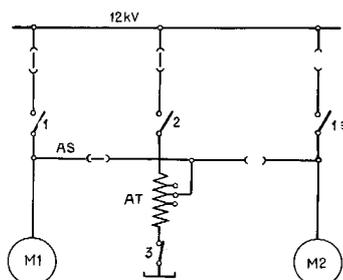
Potência em regime contínuo ($\lambda = 0,95$ cap.) 12 MW	Tensão nominal 12 kV
Corrente nominal 625 A	Velocidade 1000 rot/min
Binário de arranque $0,3 \cdot T_N$	Binário de sincronização $0,67 \cdot T_N$
	Frequência 50 Hz
	Rendimento 97,6%

O motor está previsto para um novo arranque imediatamente a quente.

A excitatriz do motor síncrono é um gerador de corrente contínua (59 kW) com excitação derivação, montado sobre o veio da máquina do lado oposto ao lado de ataque.

O autotransformador de arranque está construído como uma bobina trifásica. Entre as extremidades de cada enrolamento de fase existe uma tomada prevista para 57% da tensão nominal (existem outras tomadas livres para outros valores da tensão reduzida de arranque 53% e 62%).

O esquema de princípio de funcionamento do dispositivo de arranque mostra que é apenas utilizado um autotransformador no arranque separado e sequencial dos dois motores síncronos.

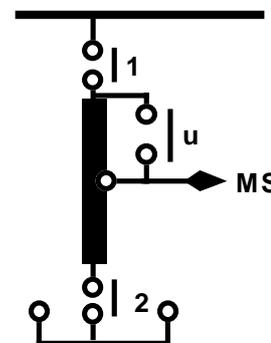


Desde que se actua na barra de ligação (—) do seccionador do motor a arrancar os dispositivos de comando actuam sobre o circuito do autotransformador. Primeiro o interruptor do ponto neutro (3) do transformador de arranque é ligado, e depois da actuação de um relé temporizador é fechado o interruptor principal do transformador (2) e é aberto um contactor que abre o circuito em derivação com uma resistência de arranque R_{si} em série com o circuito do indutor na roda polar. O motor começa a arranque sob tensão reduzida ($\approx 57\%$ da tensão nominal) e com uma intensidade da corrente de arranque reduzida. O motor adquire velocidade como motor assíncrono (com rotor em curto-circuito constituído pelo enrolamento amortecedor).

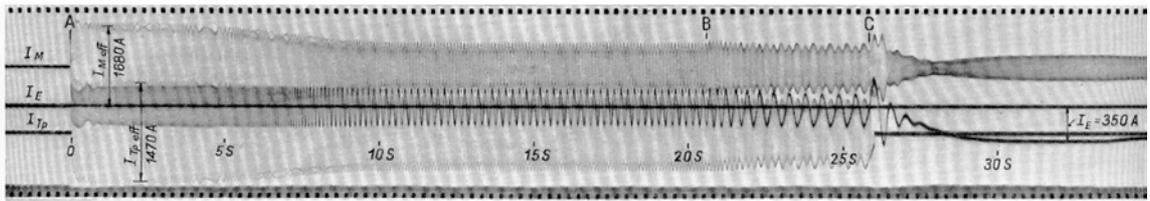
Assim que o binário motor atingiu o valor do binário de carga da bomba hidráulica (≈ 900 rot/min) o interruptor no ponto neutro do autotransformador (3) abre-se; o motor fica alimentado por uma parte do enrolamento do autotransformador que actua como uma bobina. Sendo a queda de tensão neste enrolamento parcial de 25%, a tensão de alimentação do motor é nesta altura de 75% do valor nominal. No momento de abertura do interruptor do ponto neutro, o motor é excitado, mas continua em série com o circuito indutor a resistência de arranque, com um valor da intensidade da corrente indutora que permite ainda a sincronização sem problemas.

Depois o enrolamento parcial do autotransformador e a resistência em série com o enrolamento indutor são curto-circuitados (u). O motor sincroniza e a excitação é ligada para a posição de carga (sem a resistência em série com o circuito indutor R_{si}).

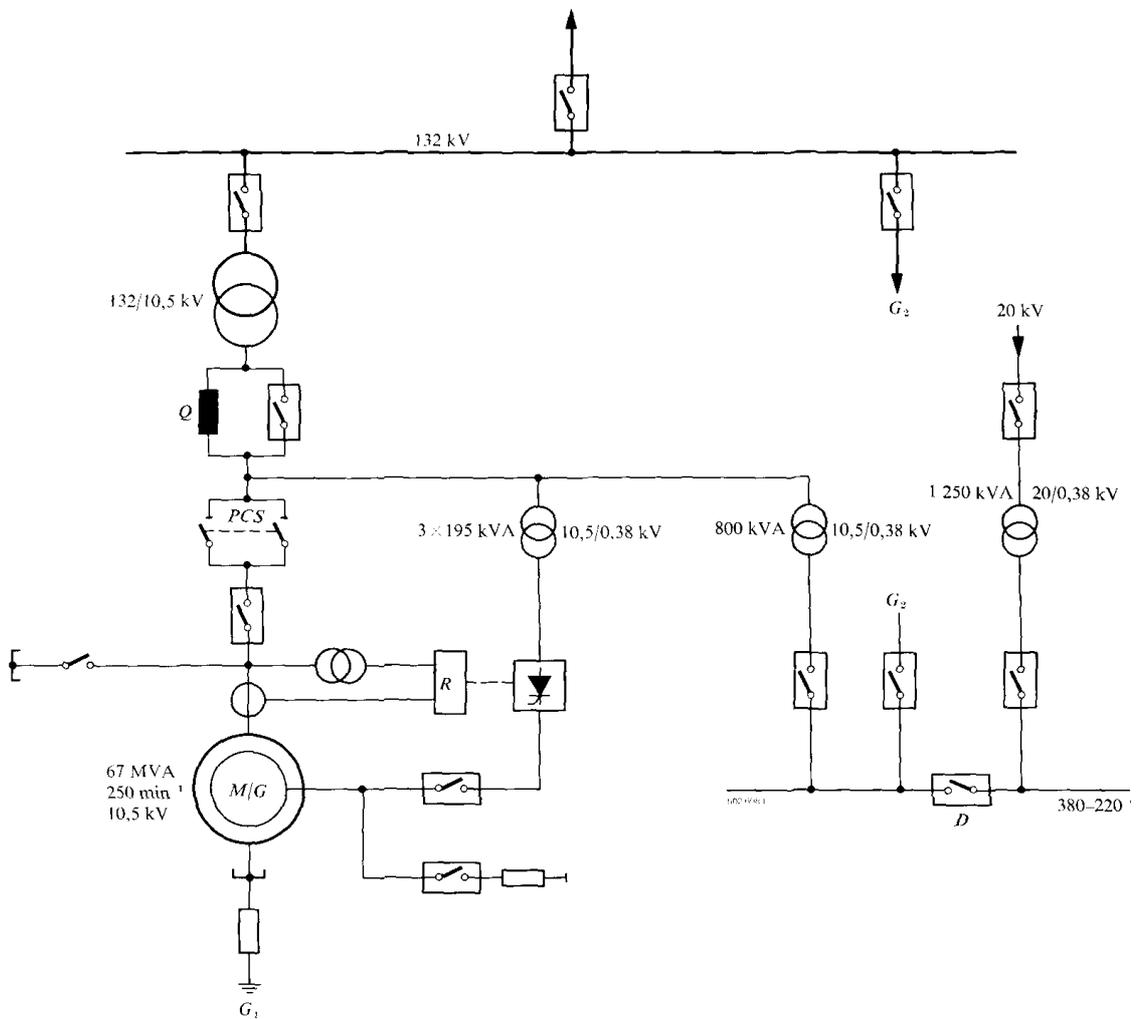
No sistema de controlo do motor existem várias bloqueios ao arranque do motor síncrono, quer



mecânicos quer eléctricos — por exemplo: não pode ocorrer o arranque sem que esteja intercalada a resistência de arranque R_{si} no circuito indutor.



I_M corrente do motor; I_{TP} Corrente de arranque no primário do transformador; I_E corrente de excitação
 A - início, ligação da excitação; B - abertura do ponto neutro; C - terceira parte

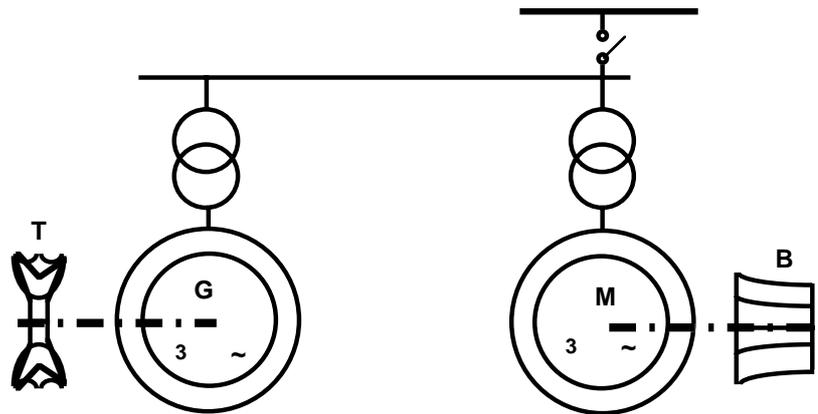


2.4 — Arranque Assíncrono–Síncrono

Durante o arranque assíncrono de um motor síncrono ocorrem perturbações — sobreintensidade de corrente — que alteram fortemente a qualidade de serviço da rede eléctrica principal, e com esse método de arranque é considerável a energia dissipada sobre a forma de calor no rotor da máquina síncrona. Com o aumento da potência unitária das máquinas síncronas que vem sendo utilizadas, torna-se problemático adoptar o arranque assíncrono.

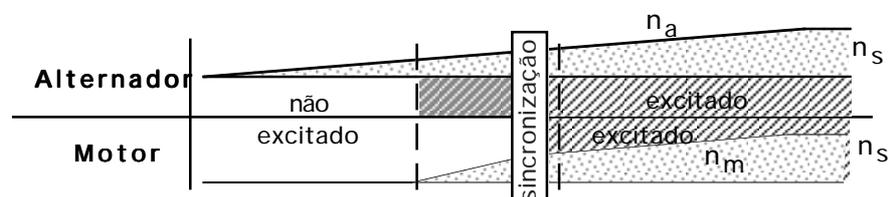
Actualmente prefere-se adoptar um tipo de arranque combinado em que os dois processos de arranque assíncrono e síncrono são utilizados.

A este tipo de arranque combinado é dado o nome de arranque assíncrono–síncrono pela Brown Boverly Company enquanto que é chamado de arranque semisíncrono pela Westinghouse Electric Corporation.



Enquanto que no método de arranque síncrono o motor síncrono tem o circuito estático alimentado por um alternador, e este pode ser accionado com uma velocidade variável, de tal forma que se inicia o processo excitando as duas máquinas, e quando o alternador começa a rodar com uma pequena velocidade dá-se a sincronização (praticamente imediata) com o motor e depois eleva-se a velocidade do alternador até à velocidade de sincronismo com a rede mantendo sempre o sincronismo entre as duas máquinas eléctricas,

no arranque combinado as máquinas interligadas não são excitadas no início do arranque, e só quando o alternador atinge uma velocidade determinada — **20% a 40% da velocidade de sincronismo com a rede eléctrica principal** — é que é ligada a excitação, aparecendo nos seus terminais uma tensão elevada, que provoca uma corrente elevada na malha que liga as duas máquinas. Desta forma os circuitos rotóricos do motor encontram-se no interior de um campo girante criado pela corrente que percorre o circuito estático — inicia-se o arranque do motor em assíncrono, enquanto que a velocidade do alternador decresce porque aumenta o binário resistente devido à corrente de carga da máquina. Ao fim de algum tempo as duas máquinas eléctricas têm a mesma velocidade; nessa altura excita-se o motor síncrono e as duas máquinas sincronizam-se. A partir desse momento o grupo continua o aumento de velocidade com as duas máquinas sincronizadas, até à velocidade de sincronismo com a rede eléctrica principal.



Este novo método de arranque, que se pode considerar como uma evolução do método de arranque síncrono mas que é uma método de arranque por variação de frequência, evita os inconvenientes conhecidos do arranque síncrono,

- não necessita, para a excitação, de fontes de corrente contínua que possam funcionar com as máquinas síncronas paradas;
- o movimento do rotor inicia-se logo no sentido de rotação do campo girante, e não pode ocorrer em qualquer um dos sentidos, como pode suceder no início do método síncrono, e
- o andamento da máquina é estável nas baixas velocidades de rotação,

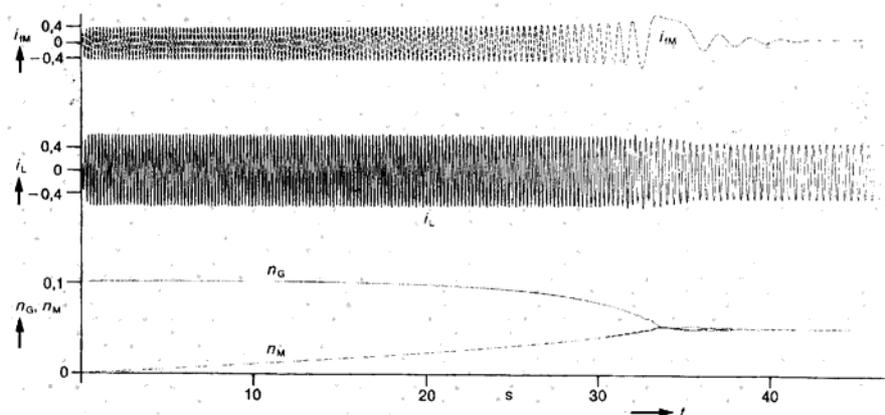
e não apresenta o inconveniente do método assíncrono normal:

- ❖ a energia dissipada em calor na roda polar é menor devido ao menor tempo de funcionamento do motor em regime assíncrono (só de 0 até $\approx 0,3 \cdot n_n$ e não de 0 até n_n) {este facto é importante nas máquinas síncronas com pólos folheados e enrolamento amortecedor, que têm dificuldade em absorver a maior quantidade de energia térmica libertada nos elementos do rotor}.

No entanto este método envolve um número elevado de variáveis e torna-se assaz complicado o seu estudo. Por isso, no estudo e no projecto de instalações para o arranque assíncrono-síncrono de uma motor de indução utilizam-se métodos de simulação computacional e, essencialmente, no projecto da instalação utilizam-se métodos matemáticos de Optimização. Um exemplo de estudo poderia ser a determinação do tipo de andamento que deveria ter a variação do binário motor desenvolvido na turbina para que se desse o aumento de velocidade das máquinas até à velocidade de sincronismo, sem a dessincronização (“perda de passo”) das duas máquinas. Na optimização procuram-se critérios que permitam realizar o arranque com: uma excitação mínima; um tempo de arranque curto; e uma libertação fraca de energia calorífica no rotor. Um exemplo de estudo de optimização poderia ser a determinação da corrente de excitação e da velocidade de rotação a que se dá a sincronização das duas máquinas para que o arranque fosse suave.

• **simulação — curvas características**

Os oscilogramas da corrente no circuito indutor do motor (i_{fM}), a corrente na linha de interconexão (i_L) das máquinas e a velocidade (n_M , n_G) estão representados na figura junta [CAN-6, p. 298] e foram obtidas pela simulação computacional do arranque assíncrono-síncrono de um motor (280 MVA, 11 kV, 375 rot/min) com o auxílio de um alternador (170 MVA, 15,5 kV, 375 rot/min).

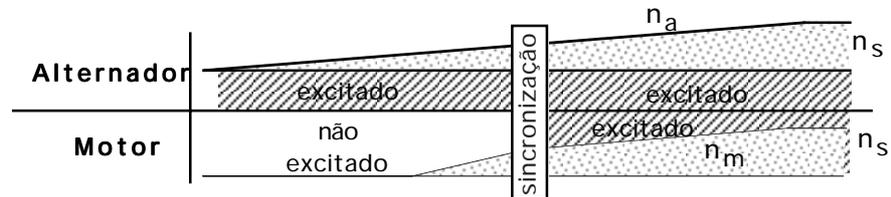


• **variantes**

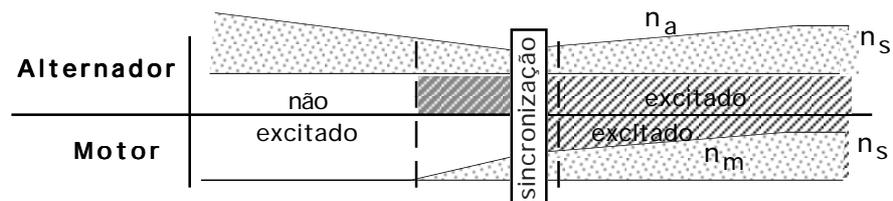
No arranque combinado assíncrono-síncrono, tal como foi descrito, a excitação do alternador é ligada só quando uma determinada velocidade ($\approx 30\% n_n$) do alternador tenha sido atingida, estando no início do processo o alternador parado.

Existem outras duas formas de realizar o arranque assíncrono-síncrono do motor síncrono:

Ligação da excitatriz do alternador com a máquina ainda parada — estando o regulador de tensão calibrado para a tensão nominal, a intensidade da corrente de excitação decresce de uma forma contínua durante o aumento de velocidade da máquina — a velocidade para a qual o arranque do motor pode ocorrer é atingida mais rapidamente.



O alternador está em desaceleração e sem excitação — como a velocidade do alternador está a decrescer regularmente (pela acção da turbina), a uma velocidade determinada excita-se o alternador, enquanto que o movimento do alternador sofre a influência do binário resistente criado pela passagem da corrente eléctrica na malha com as duas máquinas, o motor síncrono arranca em assíncrono; quando as duas máquinas tiverem atingido a mesma velocidade de rotação sincronizam-se quando se liga a excitação do motor síncrono. Nessa altura as duas máquinas passam a ser controladas pela turbina do alternador (em aceleração) completando as fases de um arranque síncrono.

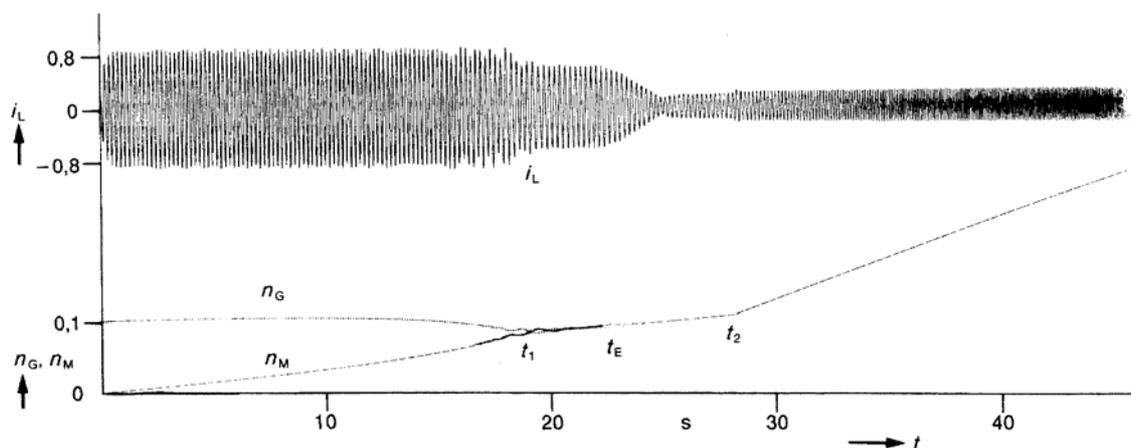


Um aspecto importante é que, neste método, a sincronização das duas máquinas é mais fácil uma vez que o alternador não está submetido a um binário acelerador: o alternador tende a seguir o motor síncrono.

• **um aspecto particular**

Na arranque assíncrono-síncrono de uma motor síncrono parece que é sempre necessário dispor de uma fonte de energia eléctrica em corrente contínua separada para ser possível fazer a ligação da excitação coma o alternador a rodar a baixa velocidade. No entanto, tal não é necessário.

Pode-se utilizar o sistema de excitação ligado ao próprio alternador para excitar essa máquina, **mas a uma velocidade maior (0,3 a 0,5 p.u.; em lugar de 0,1 p.u.)**, quando a velocidade já é suficiente para que a excitatriz ligada ao alternador possa produzir uma força electromotriz suficiente.

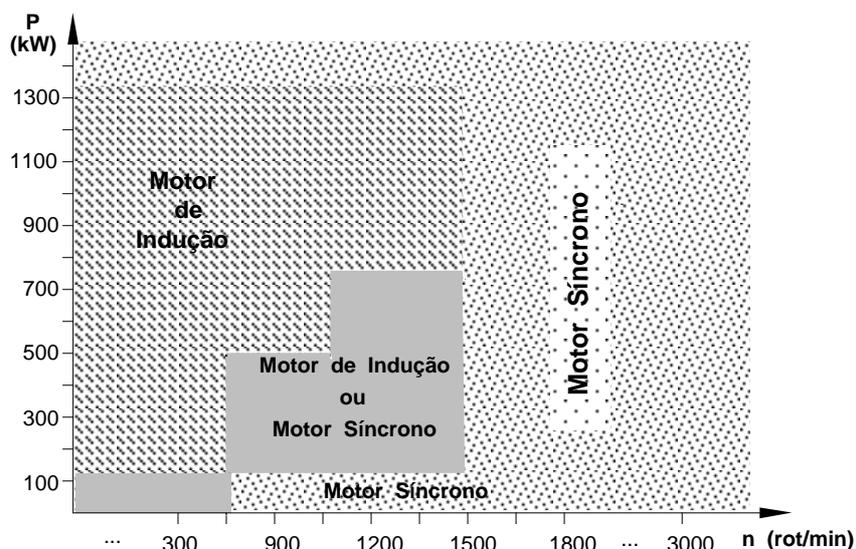


3 — Critérios de Selecção do Método de Arranque

São vários os métodos utilizados no arranque de um motor síncrono trifásico e na sua selecção é necessário atender à aplicação do motor, assim como aos aspectos de montagem, às características da rede eléctrica de alimentação e ao custo global da instalação.

3.1 — O Problema do Arranque e a Aplicação do Motor

O motor síncrono trifásico tem um domínio de aplicação vasto quanto à gama da potência útil do motor e quanto à variedade das aplicações.



De uma forma genérica a gama de utilização do motor síncrono trifásico encontra-se representada na figura junta. Definindo um ponto na escala das velocidades, $n = 600$ rot/min, que estabelece a separação entre uma baixa velocidade e uma velocidade elevada e, considerando a alta velocidade como superior a 3000 rot/min, é na gama das baixas velocidades que o motor síncrono trifásico tem a maior utilização: ou pequenos motores eléctricos, ou grandes accionamentos.

Entre as diversas aplicações existem algumas que têm particularidades a realçar.

3.1.1 — Compensador Síncrono

A máquina eléctrica síncrona tem um modo de funcionamento específico — *compensador síncrono*.

compensador síncrono — é uma máquina síncrona que funciona sem carga activa e destinada a fornecer ou a absorver potência reactiva.

Com o desenvolvimento inicial de redes eléctricas regionais surgiu a necessidade de manter a variação do valor da tensão do sistema dentro de uma gama estreita, particularmente quando havia variação da potência activa de carga da rede. Nessa função foram utilizadas as máquinas síncronas, aplicadas como alternador nas centrais hidroeléctricas e térmicas, mas depois passaram-se a utilizar máquinas eléctricas construídas especificamente para funcionarem como compensador síncrono e cuja potência reactiva nominal pode, na actualidade, atingir 250 Mvar.

A instalação de compensadores síncronos nas redes eléctricas procura resolver os seguintes problemas: regulação de tensão e trocas de potência reactiva; repartição da potência activa e da potência reactiva nas redes emalhadas; funcionamento em situação de desequilíbrio; estabilidade em regime permanente e em regime transitório; perdas no transporte de energia eléctrica.

Conforme o tipo de máquina primária de accionamento surgiram compensadores síncronos com roda polar (baixa velocidade 750 rot/min), mas também compensadores síncronos com rotor

cilíndrico (velocidade elevada — 3000 rot/min).

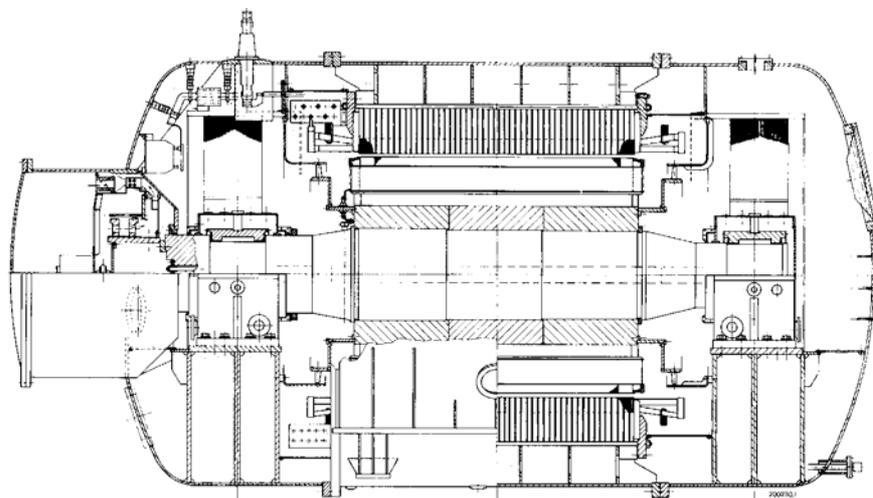
O problema do arranque de uma máquina síncrona, funcionando como compensador síncrono, é considerado como o problema do arranque de um motor síncrono sem carga mecânica. Todos os métodos de arranque dos motores síncronos podem ser utilizados, dependendo essencialmente da potência nominal do compensador, mas algumas das condições em que ocorre o arranque destas máquinas eléctricas são diferentes das normalmente encontradas no arranque dos motores síncronos. Assim:

- a. o *binário de arranque* e o *binário sincronizante* são muito pequenos, normalmente só alguns por cento do binário equivalente à plena carga da máquina ($0,0i \cdot T_N$);
- b. a *capacidade* dos condensadores síncronos pode representar uma proporção considerável da potência do sistema eléctrico em que está inserido. Por isso a corrente de arranque pode representar, se for elevada, um efeito nefasto importante sobre a rede eléctrica;
- c. o método de arranque não deve envolver máquinas eléctricas, ou métodos, que provoquem um abaixamento do *factor de potência* da instalação. Quando se arranca o compensador síncrono é porque o factor de potência global já está baixo, e não deve ser agravado pelo arranque do compensador;
- d. a situação em que se dá o arranque do compensador síncrono pode ser tal que a tensão da rede esteja abaixo do valor nominal, porque o factor de potência é baixo, ou que está acima do valor nominal, porque não existe carga eléctrica na rede.

Todos os métodos de arranque do motor síncrono trifásico foram utilizados ao longo do tempo, conforme a capacidade do compensador, mas podem-se salientar alguns aspectos particulares dos métodos disponíveis.

arranque com motor auxiliar — este método foi utilizado com os mais diversos tipos de motores eléctricos: motor de indução, motor de colectores de lâminas para corrente alternada, motor assíncrono sincronizado, motor síncrono de indução.

Um exemplo de instalação é o descrito na literatura técnica para a rede de transporte da EDF (1955; 21 Mvar, 10,5 kV \pm 7%, 50 Hz, 1000 rot/min; $t_a = 2$ min). O arranque era feito com o auxílio de um motor assíncrono sincronizado. O binário inicial de arranque era diminuído com o auxílio de uma lubrificação prévia dos mancais com óleo sobre pressão. A excitação era feita por uma máquina de corrente contínua, compensada, com 8 pólos, e pólos de comutação (75 V; 800 A), com excitatriz piloto (220V; 15 A).



Corte longitudinal de um compensador síncrono (BBC; 250 Mvar, 17 kV, 50 Hz, 750 rot/min)

3.1.2 — Accionamento de Compressores

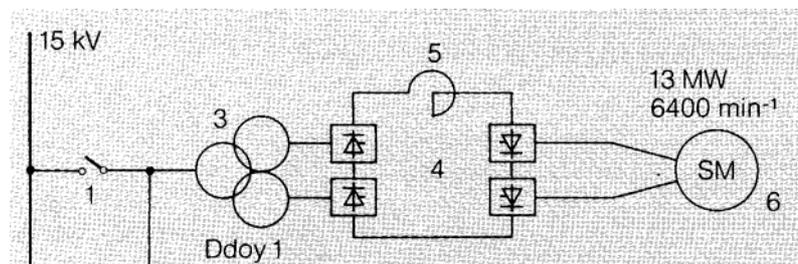
Nesta aplicação do motor síncrono trifásico — accionam compressores de ar, compressores de refrigeração, e compressores para gases químicos — existem alguns problemas provocados pelo carácter variável do binário de carga (binário de compressão + binário de inércia + binário de atrito) durante um ciclo de funcionamento do compressor. O motor síncrono, admitindo ligeiras perturbações do binário de carga, perde a tendência para manter o sincronismo quando aquelas perturbações são demasiado violentas. Surgem, assim, problemas críticos de estabilidade do accionamento, a que se juntam os problemas comuns na utilização do motor síncrono: problema do arranque, que nesta aplicação é normalmente um *arranque assíncrono*, problema de sincronização e de protecção e o problema de alimentação em corrente contínua do circuito indutor.

Nesta aplicação do motor síncrono é importante a lubrificação do motor síncrono e *do compressor* na fase inicial de arranque.

Nesta aplicação existe uma grande variedade de comportamento do binário de carga, que depende do tipo, dos cilindros e dos andares do compressor. No entanto o binário de carga, apresentado por um compressor é essencialmente irregular — com flutuações durante um ciclo — o que acarreta flutuações da corrente de carga do motor. Por sua vez esta flutuação da corrente causa flutuações da tensão de rede devido à queda de tensão nas impedâncias do circuito de alimentação.

O motor síncrono aplicado no accionamento de uma compressor é, normalmente, de construção própria procurando-se com a inserção de circuitos rotóricos em curto-circuito (gaiolas) obter um bom binário de arranque e o amortecimento das flutuações do binário de carga.

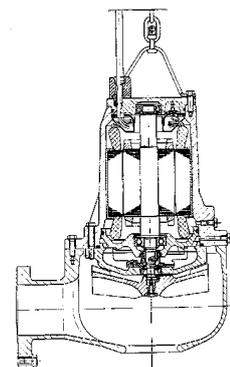
Foram já aplicados motores síncronos com uma potência unitária de 13 MW no accionamento de turbocompressores na indústria química. Neste caso o motor síncrono (13 MW, 2 x 3,1 kV, 5700 a 6400 rot/min, 2 pólos, refrigerado a ar) era alimentado por um conversor estático de frequência formado por dois rectificadores comutados pela rede e dois onduladores comutados pela carga, que além de regular a velocidade do motor comandava-o também durante o arranque.



3.1.3 — Accionamento de Bombas Hidráulicas

O accionamento das bombas hidráulicas — que podem ser centrífugas ou ser de fluxo axial (hélice ou parafuso) — pode ser feito também com motores síncronos, tendo nesse caso circuitos rotóricos em curto-circuito (gaiolas), ou são construídos pólos maciços. O arranque do motor poderá ser directo (arranque assíncrono) ou com bobina (arranque assíncrono com bobina). Frequentemente a bomba a accionar tem o veio vertical e, por isso, são utilizados motores eléctricos com veio vertical.

Como o trabalho de bombagem é, normalmente, contínuo o motor eléctrico deve ser concebido com um elevado rendimento, pois neste caso o maior investimento inicial no motor é amortizado pela diminuição do custo da energia consumida. É nesta situação que se utiliza o motor síncrono como compensador síncrono (na correcção do factor de potência global da instalação).



Uma aplicação do motor síncrono trifásico no accionamento de bombas hidráulicas de grande caudal e baixa velocidade é no armazenamento de água em albufeiras para irrigação ou para produção de energia eléctrica. Esta aplicação, que actualmente, se reveste de importância particular, será tratada neste texto em 4. — *O Accionamento de Bombas-Turbinas.*

3.1.4 — Accionamento com Motores Síncronos Especiais

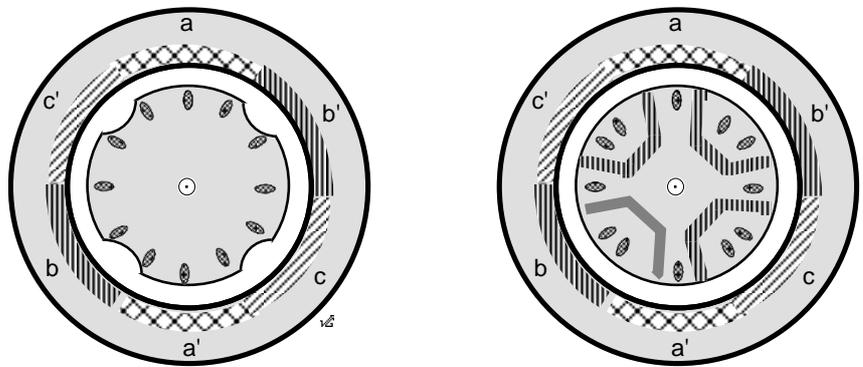
Nos últimos anos tiveram grande estudo e algum desenvolvimento motores síncronos de construção especial — o *motor de relutância* e o *motor de ímanes permanentes*.

- **motor de relutância**

A expressão para o binário electromotor da máquina síncrona de pólos salientes funcionando como motor mostra que em regime permanente sinusoidal síncrono o motor síncrono trifásico apresenta um binário de excitação e um binário de relutância. Se não existir um circuito indutor, $E_0 = 0$, sendo a máquina simplesmente excitada, o binário que a máquina apresenta, em regime permanente síncrono, é apenas o binário de relutância, [LAW-1],

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \cdot \left(\left(\frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \right) \cdot U^2 \sen 2\delta \right) = \\ &= \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \cdot \left(\left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \cdot \frac{U^2}{2 \cdot X_d} \sen 2\delta \right) \end{aligned}$$

O valor do binário é dependente da razão X_d/X_q . Assim, alterando os aspectos construtivos da máquina procura-se construir um novo tipo de máquina síncrona, o *motor de relutância*, que apresente uma relação X_d/X_q com valor superior a 2 e atingindo, em situações experimentais, valores próximos de 7, ($2 < X_d/X_q < 7$).



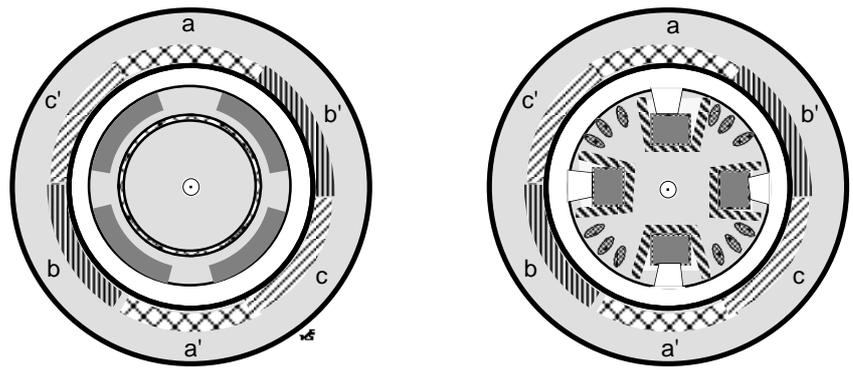
Para a obtenção daquela razão entre os valores da reactância síncrona longitudinal X_d e da reactância síncrona transversal X_q , recorre-se a métodos construtivos que promovem a alteração da geometria do rotor do motor [AMS-1], e a métodos construtivos que prevêm a inclusão de materiais com relutância magnética diferente da do ferro, para vincar a anisotropia do circuito magnético do motor.

Para assegurar o arranque do motor, e acelerá-lo até à velocidade de sincronismo, possuem, normalmente, este tipo de motores síncronos trifásicos, na gama de média potência, (dezenas de kW), um enrolamento em gaiola do tipo do utilizado nos motores de indução, [LAW-1] [AMS-1].

- **motor de ímanes permanentes**

Um outro tipo de motores síncronos trifásicos que na actualidade tem grande utilização é o tipo de motores que têm um sistema indutor formado por ímanes permanentes; trata-se do *motor de ímanes permanentes*. Devido ao desenvolvimento de novas ligas magnéticas permanentes, como as baseadas em terras raras, foi possível construir motores eléctricos de ímanes permanentes

para gamas de potência da ordem das dezenas de kW.



Têm sido várias as formas construtivas adoptadas no projecto do rotor dos motores de ímanes permanentes. A colocação dos ímanes, no interior do rotor ou na periferia do rotor, têm sido estudadas devido à influência que têm no valor dos parâmetros da máquina: X_d , X_q , e E_o . Também este tipo de motores pode ser dotado de um enrolamento rotórico em gaiola, total ou parcial, que desempenha as funções de amortecedor e promove o arranque do motor.

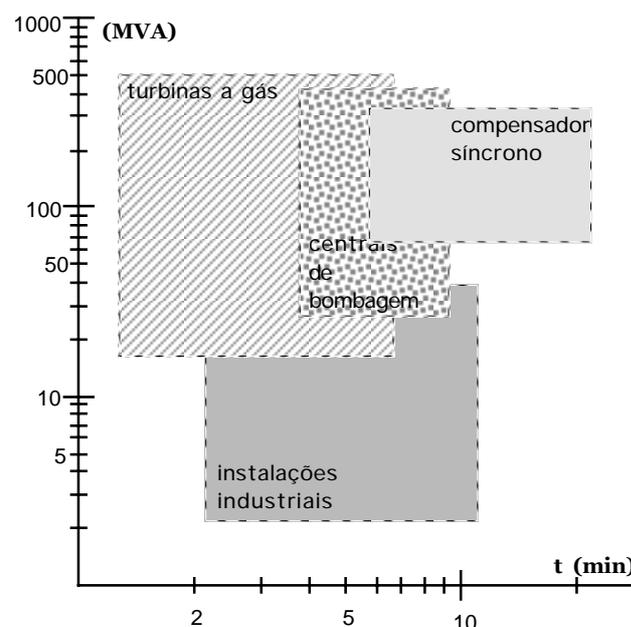
- **motor síncronos híbridos**

Na procura de um motor síncrono que combine boas características de arranque, com um forte binário de relutância, e com excitação criada por ímanes permanentes desenvolveram-se **motores síncronos trifásicos híbridos**, onde, no circuito magnético rotórico existe, de uma forma estudada, parte de um circuito em gaiola, ímanes permanentes, barreiras de fluxo e material condutor, tudo embutido no material ferromagnético do rotor.

Nos motores síncronos especiais, devido á sua baixa potência, o método de arranque é um **arranque assíncrono directo**.

3.1.5 — Domínio de Aplicação

Recorrendo à experiência acumulada, um gráfico, como o apresentado, pode dar a ideia da potência aparente nominal e do tempo de arranque para alguns tipos de aplicações.



3.2 — Critérios de Selecção

O problema do arranque de um motor síncrono surge com a necessidade de esta fase especial do funcionamento do motor ocorrer sem que se altere a qualidade de serviço de fornecimento de

energia eléctrica — sem alterar as características da rede eléctrica —, mas realizando-se a entrada em funcionamento do motor, isto é arrancando o motor independentemente do tipo de carga mecânica a que está ligado.

Surgem assim três critérios para a selecção do método de arranque de um motor síncrono trifásico.

critério sobre as condições da rede eléctrica

A legislação (Regulamentos de Segurança) impõe restrições à queda de tensão admissível numa instalação eléctrica para salvaguardar a qualidade de serviço de distribuição de energia eléctrica.

O artigo 431º § 2 do RSUIEE – Regulamento de Segurança das Instalações de Energia Eléctrica estabelece que: "A intensidade absorvida por um motor durante a seu arranque ou por um conjunto de motores que possam arrancar simultaneamente deverá ser limitada a um valor que não seja prejudicial à canalização que os alimenta nem cause perturbações inaceitáveis ao funcionamento de outros aparelhos ligados à mesma fonte de energia."

A selecção do método de arranque pode ser influenciada pelas condições impostas pela rede eléctrica, principalmente no caso de motores de potência elevada.

O artigo 425º do RSUIEE – Regulamento de Segurança das Instalações de Energia Eléctrica estabelece que: "A queda de tensão admissível desde a origem da instalação de utilização até ao aparelho de utilização electricamente mais afastado, supostos ligados todos os aparelhos de utilização que possam funcionar simultaneamente, não deverá ser superior a 3% ou a 5% da tensão nominal da instalação, respectivamente para os circuitos de iluminação e para circuitos de outros usos."

Atendendo a que motores de potência elevada requerem uma quantidade significativa de energia reactiva, suficiente para influenciar o factor de potência global da instalação, evitam-se métodos de arranque que contribuam para agravar o factor de potência global. São assim de evitar os métodos que aumentam a reactância indutiva da rede eléctrica de alimentação — arranque assíncrono, a tensão reduzida ou normal, mas com bobina ou com transformador associado.

Uma rede eléctrica com uma potência de curto-circuito elevada permitirá um arranque directo para um motor de pequena ou média potência, mas uma rede eléctrica de baixa potência de curto-circuito apenas permitirá um arranque síncrono com auxílio de um alternador auxiliar, ou com um conversor de frequência, no entanto poder-se-ia utilizar um arranque com motor auxiliar.

O artigo 431º § 3 do RSUIEE – Regulamento de Segurança das Instalações de Energia Eléctrica estabelece que: "Em instalações de utilização alimentadas a partir de uma rede de distribuição pública não poderão ser ligados, salvo acordo prévio do distribuidor, motores cuja potência pedida no arranque seja superior a 10 kVA ou 30 kVA, respectivamente para motores monofásicos e trifásicos."

critério sobre a carga mecânica accionada

O principal problema está relacionado com o binário de arranque imposto pela carga (binário resistente de arranque) e pelo respectivo momento de inércia.

Uma carga mecânica que requer um elevado binário de arranque não é compatível com uma rede eléctrica de fraca potência, senão terá de se utilizar um método de arranque síncrono ou um método de arranque com motor auxiliar. Uma carga mecânica que, conjuntamente com o motor, apresenta um elevado momento de inércia, tem um tempo de arranque mais elevado, o que condiciona as características de aquecimento (e o tipo de refrigeração) do motor síncrono.

É uma boa norma considerar que o arranque de grandes máquinas deve ser realizado com a máquina em vazio!

Também convém ter presente que máquinas centrífugas requerem um binário de arranque menor, o que permite uma selecção mais fácil do método de arranque, do que máquinas com movimento alternativo (característica de carga constante)

Também a frequência dos arranques de uma máquina (número de arranques por hora) condiciona as características de aquecimento (e o tipo de refrigeração) do motor síncrono.

Na selecção do método de arranque para motores de pequena e média potência há que ter especial cuidado na selecção do motor, porque podem-se fabricar motores com baixa corrente de arranque, {o que pode ser difícil é encontrar o vendedor !...}.

critério sobre a poluição harmónica

A presença de grandezas eléctricas com andamento sinusoidal de frequência elevada — os harmónicos — nos sistemas eléctricos que alimentam máquinas eléctricas é responsável pelo aparecimento de um conjunto de problemas capazes de alterarem o funcionamento dos aparelhos de utilização de energia eléctrica. Numa situação de distorção da forma de onda das grandezas eléctricas podem surgir problemas de aumento das perdas de energia, de interferência com as rede de telecomunicações, de aumento de ruído e das vibrações produzidas, de ferroressonância.

Perante o aparecimento de consumidores que são fortes produtores de harmónicos existe a necessidade de se estabelecerem restrições que se traduzem na criação de regulamentação impondo valores limites para a distorção criada pelo consumidor nos pontos de ligação do consumidor à rede eléctrica geral. Caracterizando a distorção pelo factor de distorção harmónica FDH. — $FDH < 1,6\%$, ou $0,6\%$ do termo fundamental para os harmónicos ímpares e 1% do termo fundamental para os harmónicos pares.

Quando no processo de arranque se utilizam conversores electrónicos com elementos semicondutores em comutação — arranque assíncrono com motor auxiliar de indução comandado por conversor electrónico, arranque síncrono com conversor electrónico — pode-se melhorar a situação de poluição harmónica com equipamento de filtragem, essencialmente filtros dimensionados para os harmónicos 5, 7, 11 e 13. Este equipamento auxiliar agrava o custo da instalação.

Na selecção de um método de arranque para uma determinada aplicação pode-se utilizar um método matricial de selecção e elaborar um quadro de selecção, como o que é apresentado.

Quadro de Selecção							
Método de arranque	Rede 1 GVA 110 kV	Rede 80 MVA 110 kV	Binário resistente elevado	Binário resistente fraco	Poluição harmónica	factor de custo (4 MW)	Notas
<i>directo</i>	preferível	queda de tensão inaceitável	preferível		—	1	—
<i>motor auxiliar</i>	se arranque suave	arranque garantido	arranque sem problemas	não alto custo	—	2	manutenção do motor auxiliar
<i>síncrono</i>	se arranque suave	arranque garantido	arranque sem problemas		não recomendado	4 – 5	—
<i>assíncrono bobina</i>	se arranque directo inaceitável	a avaliar	não recomendado	se for importante a queda de tensão	—	1,4	—
<i>assíncrono transformador</i>	se arranque directo inaceitável	a avaliar	não recomendado	se for importante a queda de tensão	—	1,5	—

Note que este quadro deve ser apenas considerado como um exemplo das diversas hipóteses a considerar no momento de selecção do método de arranque..

4 — O Accionamento de Bomba–Turbina

Uma aplicação do motor síncrono trifásico que na actualidade tem uma grande importância e que no futuro poderá vir a tornar-se essencial para a sobrevivência de uma forma de vida, é o accionamento das grandes bombas–turbina que permitem não só a produção de energia eléctrica, mas também o armazenamento e a movimentação de grandes volumes de água.

4.1 — A Água

A água é um bem escasso.



a água não é um produto comercial como outro qualquer, mas um património que deve ser protegido, defendido e tratado como tal.

Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho

É comum apresentarem-se como dados rigorosos que o volume de água utilizável pela humanidade representa a centésima milionésima parte do total de água existente no planeta, representa a milésima parte da água doce não gelada, e representa a vigésima parte da água que entra no ciclo hidrológico. Estes valores mostram como é importante cuidar deste património da humanidade, se não se pretende alterar irreversivelmente o equilíbrio ecológico.

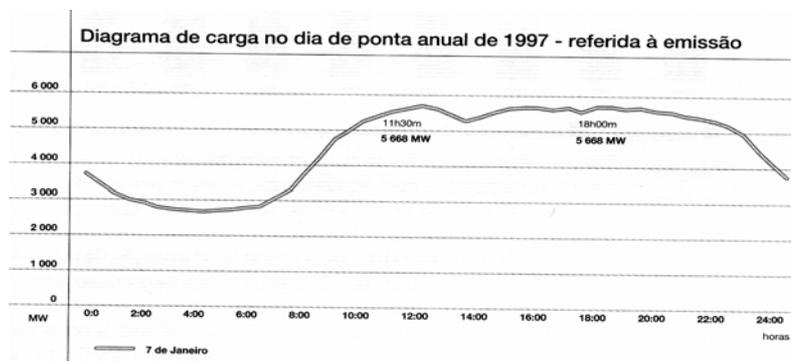
Mas, para o engenheiro electrotécnico a água constitui não só um bem necessário à vida mas também, em certas condições, constitui uma fonte de energia susceptível de ser aproveitada na produção de energia eléctrica. Nesta perspectiva há não só a consideração de uma utilização consumível da água, como nos abastecimentos públicos, na indústria e na agricultura, mas também se considera a utilização não consumível da água, como se dá na recreação, na navegação ou na produção de energia eléctrica.

Como há uma interacção grande entre a utilização da água e as condições de vida no meio ambiente, verifica-se que:

- é necessário um rigoroso conhecimento do meio ambiente para gerir racionalmente os recursos hídricos.

Mas enquanto a sociedade actual está fundamentada no fornecimento garantido da água, a água não se encontra repartida uniformemente pela superfície da Terra. Existem zonas em que abunda e existem zonas onde escasseia a água superficial ou a água subterrânea, tanto num continente, como num país ou como numa região. Também essa repartição natural pode não coincidir com a distribuição da população nem estar adaptada ao volume das suas carências.

Surge assim a necessidade de movimentar grandes volumes de água.



Devido a uma característica própria da energia eléctrica — *em cada instante a energia produzida tem de ser igual á energia consumida* — um aproveitamento hidroeléctrico tem de ser gerido de uma forma criteriosa, e a interligação de aproveitamentos (criando uma situação de ser a capacidade

de produção superior ao consumo e a necessidade de uma reserva girante) reforça a necessidade de uma gestão e de um planeamento mais cuidadoso do sistema produtor.

Se o caudal do rio for tal que a potência disponível na central é superior à potência pedida à central a água necessita de ser armazenada ou alimentará um descarregamento turbinável (representando uma perda de energia).

Como o consumo de energia eléctrica, ao longo do dia, não é constante e ocorrem duas situações diferenciadas, bem patentes no diagrama de cargas — os períodos de ponta e os períodos de vazio. A forma como o sistema electroprodutor pode responder a esta situação levou a atribuição de custos diferentes à energia eléctrica produzida em cada período.

Para que não existam descarregamentos turbináveis, pode-se aplicar a energia disponível no accionamento de bombas.

Perante uma racionalização da produção de energia há que atender aquela diferenciação do custo da energia eléctrica, justificada também nas possibilidades de actuação sobre os elementos do sistema produtor de energia.

- é necessário armazenar água no período de vazio para a utilizar na produção de energia no período de ponta.
- fundamentalmente está-se a aplicar o princípio de: Substituir uma Energia por Outra Mais Valiosa.

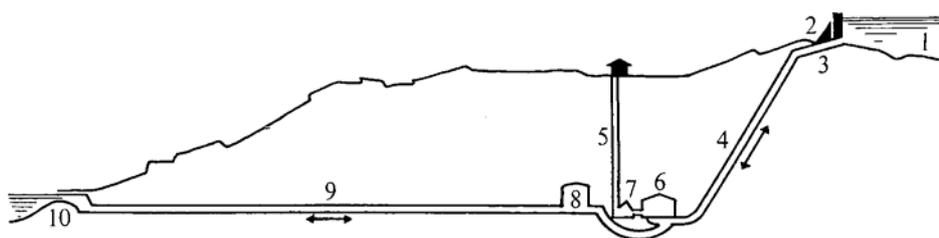
Surge assim justificado a utilização do armazenamento de água — interanual, intersazonal, interdiária, ou interhorária —, como uma das formas mais acessíveis e úteis de armazenamento de energia eléctrica, embora também seja necessário encontrar a sua justificação na análise de outros critérios como os de *impacte ambiental*, que por isso também têm de ser considerados.

- é necessário considerar que a água utilizada na produção de energia eléctrica não é consumida, mas depois de turbinada é restituída ao curso de água, embora essa produção provoque perturbações do meio ambiente.

Sistematizando, a necessidade de se proceder à movimentação de um grande volume de água — *bombagem* — acompanhada, preferencialmente, de produção de energia eléctrica, mas podendo ocorrer simplesmente como movimentação de um fluido, pode resultar de:

- *critérios de gestão de recursos hídricos* — aproveitamento de épocas chuvosas, regularização de caudais, transvases — que permitam um melhor aproveitamento da água em tempo ou em zonas diferenciadas;
- *critérios electrotécnicos* — armazenamento de energia barata para produção de energia cara — que permitem a racionalização da produção de energia eléctrica considerando as características do consumo dessa energia e a globalidade do sistema eléctrico produtor.

Na realização dos aproveitamentos hidroeléctricos capazes de dar satisfação às imposições resultantes da aplicação daqueles critérios têm especial importância os aproveitamentos com um sistema de bombagem-turbinagem, que permitem não só a bombagem da água para montante do aproveitamento (reservatório), mas também que se sirvam, em tempo conveniente, da água armazenada a montante para a produção de energia eléctrica.



1 – albufeira superior (reservatório); 2 – barragem; 3 – canal; 4 – conduta forçada; 5 – poço de cabos e ventilação; 6 – central; 8 – câmara de equilíbrio; 9 – galeria; 10 – restituição

4.2 — A Bomba-Turbina

A acção reguladora da albufeira de uma aproveitamento hidroeléctrico pode ser realçada, quando se dispõe de um excesso de energia útil, com um adequado aproveitamento de bombagem. Com este sistema é possível armazenar na albufeira a montante, utilizando o excesso de energia, a água de uma albufeira, ou de várias albufeiras, a jusante do aproveitamento.

Nos primeiros aproveitamentos hidroeléctricos com bombagem (1879; Letten) eram completamente independentes os dois sistemas: o sistema de produção de energia eléctrica (turbinagem), formado por uma turbina e um alternador, do sistema de bombagem, formado por uma bomba hidráulica accionada por um motor eléctrico. O equipamento do aproveitamento com sistemas separados foi utilizado até à década de 30 do século vinte.

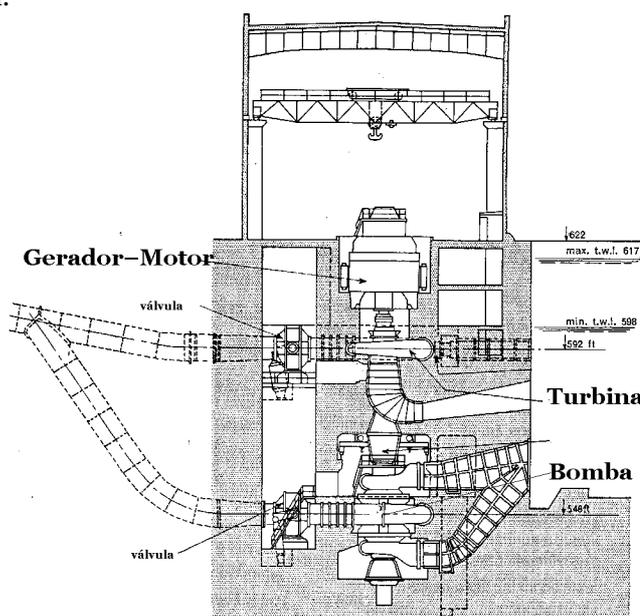
A utilização de uma única máquina eléctrica como gerador e como motor — *aproveitando a reversibilidade de funcionamento das máquinas eléctricas síncronas* — deu-se de duas formas:

- ✿ **grupos ternários** — neste grupo de máquinas, ligadas por um mesmo veio existem três máquinas: para além do alternador-motor existem duas máquinas hidráulicas distintas — a turbina e a bomba hidráulica.

A disposição do veio comum das três máquinas pode ser horizontal (grupos de pequena e média potência) ou pode ser vertical.

A ligação entre o alternador-motor e a turbina é, normalmente, uma ligação permanente, enquanto que a ligação entre o veio desse conjunto de máquinas e a bomba hidráulica pode ser temporária, utilizando um sistema, mecânico ou hidráulico, de embraiagem.

A potência da bomba e da turbina podem ser diferentes, mas durante o funcionamento como alternador (ou como compensador síncrono) a bomba é desacoplada do veio, para diminuir as perdas mecânicas introduzidas pela bomba mesmo quando está desafogada. Para desafogar a bomba, ou a turbina durante o funcionamento em bombagem, utiliza-se ar comprimido.



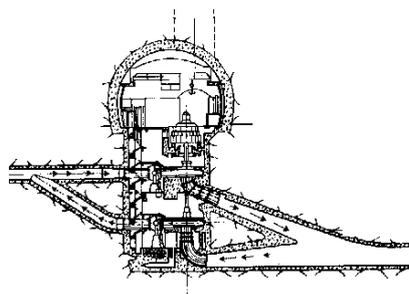
A bomba, quando o sistema de embraiagem é mecânico, é lançada por uma turbina auxiliar, o que permite levar a bomba até à velocidade nominal num intervalo de tempo curto (≈ 15 s).

O processo de arranque de uma bomba num sistema ternário pode ter as seguintes etapas ($t \approx 100$ s):

- a. colocação em serviço da turbina;
- b. realização do paralelo do alternador com a rede eléctrica;
- c. desafogamento da turbina e da bomba;
- d. arranque da turbina (com auxílio da turbina auxiliar)
- e. ligação da bomba ao veio geral à velocidade nominal
- f. expulsão do ar e enchimento da bomba:

g. abertura da válvula de enchimento e entrada em carga

O aproveitamento hidroeléctrico do Alto Rabagão (concelho de Montalegre; região



do Barroso) foi o primeiro aproveitamento português construído com o objectivo principal de regularização interanual, armazenando da água nos anos de abundância para aproveitá-la na produção de energia eléctrica nos anos de seca. Projectado em 1958, entrando em serviço em 1964, foi dotado com dois **grupos ternários** máquina

síncrona-turbina-bomba de eixo vertical, com sentido único de rotação, destinados a elevar água para a albufeira a montante (10 km x 2 km; 1000 milhões de kWh) a partir da albufeira da barragem da Venda Nova imediatamente a jusante do ponto de restituição. Nos grupos ternários de máquinas hidroeléctricas, as bombas são rapidamente acopláveis aos veios dos grupos, por intermédio de sistemas de embraiagem.

As características de cada máquina são:

ALTERNADOR/MOTOR — 45 MVA; 10 kV; 50 Hz; 428 rot/min

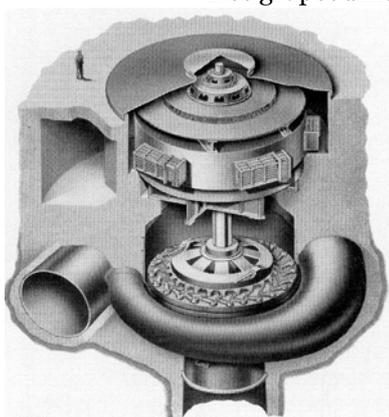
potência absorvida na bombagem = 63 MW

TURBINA — 50 000 CV; 428 rot/min; 49 m³/s [170 m de queda útil]

BOMBA — 43000 CV; 428 rot/min; 37 m³/s [140 m de elevação]

- ✱ **grupos binários** — neste grupo de máquinas, ligadas por um mesmo veio existem duas máquinas: o alternador-motor e uma bomba-turbina. Verifica-se que o rendimento do grupo binário não é inferior ao rendimento de um grupo com turbina e bomba separadas, mas o preço da instalação e de construção do grupo binário é menor.

Nos grupos binários podem distinguir-se dois tipos de máquinas hidráulicas:



grupos de máquinas reversíveis — são grupos de máquinas hidráulicas que alteram o seu funcionamento com alteração do sentido de rotação do veio.

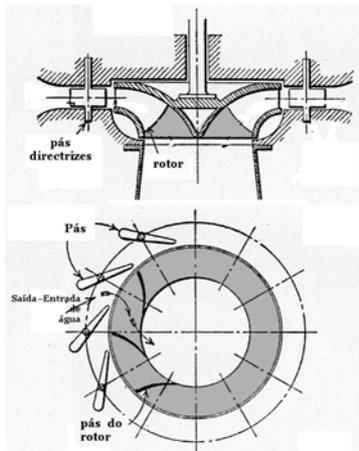
grupos de máquinas isóginas — são grupos de máquinas hidráulicas que alteram o seu funcionamento sem terem de alterar o sentido de rotação do veio.

Ao longo do tempo desenvolveram-se várias soluções, vários tipos de máquinas hidráulicas capazes de trabalharem como bomba-turbina. A sua aplicação resulta de considerações com a altura de queda. No entanto, a máquina hidráulica com aplicação mais vulgarizada é uma máquina derivada da turbina

Francis simples: tem um distribuidor difusor com pás directrizes orientáveis. Através da regulação da posição dessas pás directrizes faz-se a regulação da potência do grupo quando funciona em regime de turbinagem.

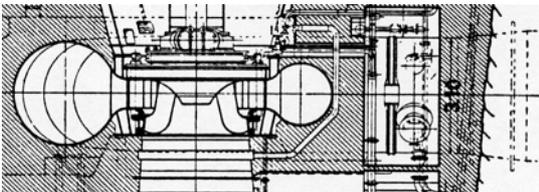
bomba-turbina — uma turbina Francis {desenvolvida por James B. Francis (1815-1892)} convencional não funcionaria bem como bomba. A roda da turbina, desenhada para ser movimentada pela água, não tem boas qualidades como propulsor da água (um fluxo instável na bombagem causaria ruído, vibrações e uma eventual avaria do rotor). Por isso na concepção de uma bomba turbina deve adaptar-se uma bomba ao funcionamento como turbina. O resultado o rotor de uma bomba-turbina tem um diâmetro maior do que o de uma turbina Francis, e os elementos do distribuidor estão desenhados para proporcionarem um

rendimento elevado nos dois sentidos de deslocação da água. Para evitar a cavitação, uma turbina Francis a funcionar como bomba teria de estar submersa a uma profundidade maior do que uma bomba-turbina. Como as turbinas Francis as bombas-turbina são construídas em aço fundido, a moldagem é realizada de uma só vez, sendo a superfície tratada com uma pulverização de metal duro, para aumentar a resistência à abrasão e à cavitação.



No funcionamento de uma bomba-turbina, antes do arranque, as pás directrizes orientáveis são fechadas e injecta-se ar comprimido na zona da bomba de forma que a água fique abaixo do nível da roda da turbina. Então a bomba-turbina é colocada em movimento {aquí dá-se o arranque do motor eléctrico} — com a roda no ar — o que diminui consideravelmente o binário resistente a vencer pelo motor eléctrico (e a perturbação da rede eléctrica com o arranque). Quando o grupo atingiu a velocidade de regime, liberta-se o ar existente na bomba, a água sobe e preenche o espaço da bomba (a roda e a caixa espiral) {designa-se como *bomba cheia*}. Depois de todo o ar ser expelido, e a roda estar parcialmente submersa, abrem-se as pás do distribuidor e a unidade começa a bombear.

- Arranque e Sincronização com distribuidor e válvula fechados
- Evacuação do ar comprimido e enchimento (total ou parcial) da máquina com água, continuando o distribuidor e a válvula fechados
- A abertura da válvula e controlo da potência consumida regulada pela abertura das pás directrizes



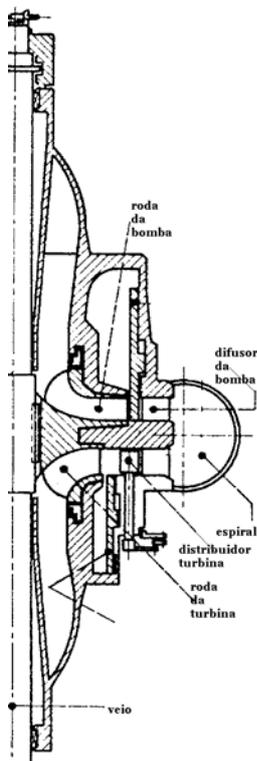
Note-se que se o distribuidor não tiver pás directrizes reguláveis, utiliza-se uma válvula borboleta para controlar o movimento da água. No processo de arranque a válvula realiza as manobras correspondentes à actuação das pás directrizes orientáveis.

Durante o funcionamento a posição das pás do distribuidor são ajustadas para permitir uma bombagem com rendimento máximo, devido à diminuição da corrente de água com o aumento da altura de bombagem (provocada pela subida gradual da superfície do reservatório).

Na situação de retirada da bomba de serviço é preciso atender a que a potência eléctrica absorvida da rede necessária para fazer rodar a bomba cheia com as pás directrizes do distribuidor fechadas pode ter um valor suficientemente elevado para causar perturbação na rede eléctrica no momento da interrupção (poderá ser 40% a 90% da potência nominal). Por isso na manobra de desligar a bomba, depois de fechar as pás directrizes, injecta-se ar comprimido e expele-se a água da zona da roda, enquanto se reduz a potência absorvida (para 3% a 5% do valor nominal) {porque se reduziu o binário resistente devido à movimentação da água na zona da roda}.

Nalgumas aplicações conseguiu-se um melhor funcionamento global do aproveitamento com a bomba-turbina funcionando a uma velocidade como bomba (300 rot/min) e a uma velocidade menor (257 rot/min) como turbina — surge assim a necessidade de a máquina síncrona funcionar em dois escalões de velocidade.

grupo isógiro — a passagem da função de turbinar à função de bombear faz-se sem inversão do sentido de marcha do grupo. Esta máquina hidráulica é constituída por uma espiral que alimenta duas rodas Francis, montadas sobre um veio comum: uma funciona como bomba, estando o seu desenho para isso preparado e outra funciona como turbina (também com projecto optimizado).



Existe um ante-distribuidor que cria o desvio que permite que o funcionamento como turbina e como bomba se faça no mesmo sentido de rotação.

Esta máquina hidráulica, utilizada em quedas com 135 m de altura, tem uma excelente estanquicidade e a alteração do débito dá-se sem a introdução de vibrações.

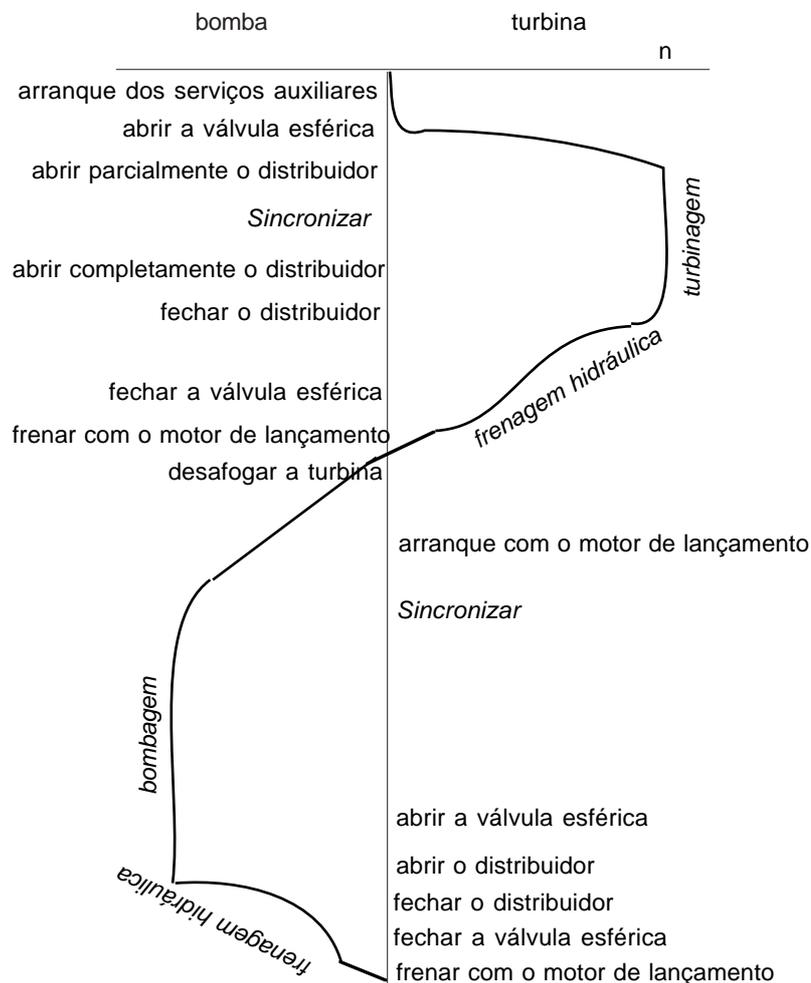
Como o funcionamento de um grupo isógiro é relativamente simples e rápido, os tempos de manobra são condicionados por considerações hidráulicas.

Em Portugal existem os aproveitamentos da Aguieira (rio Mondego), do Torrão (rio Tâmega) e do Alqueva (rio Guadiana) onde estão aplicados grupos binários com bomba-turbina.

4.3 — Diagrama de Funcionamento Bomba-Turbina

Um grupo bomba-turbina inserido num aproveitamento hidroeléctrico pode ter três modos de funcionamento: turbinagem, bombagem e como compensador síncrono.

A passagem de um modo de funcionamento a outro terá de ser acompanhada por um conjunto de manobras que, no caso da passagem de turbina a bomba, estão figuradas no diagrama junto.



4.4 — O Motor-Alternador

A máquina síncrona a utilizar num aproveitamento hidroeléctrico com funções de bombagem tem um projecto e aspectos construtivos diferentes da máquina clássica, atendendo às exigências hidráulicas, às condições da rede eléctrica e aos aspectos específicos desta aplicação.

A potência máxima de cada unidade depende do aproveitamento hidráulico, pois pode suceder que a potência útil de bombagem difira consideravelmente da potência útil como gerador — tudo

depende das características hidráulicas do aproveitamento. Claro que para uma velocidade da máquina única, seria mais económico que as duas situações utilizassem a mesma potência aparente. Mesmo as características do aproveitamento – pequena albufeira a montante, grandes albufeiras a montante e a jusante, variações sazonais da altura útil – obrigam a que seja necessário definir os principais parâmetros mecânicos (potência, velocidade) para cada aproveitamento.

Mas outros parâmetros hidromecânicos tem influência no projecto da máquina eléctrica: uma ou duas velocidades de accionamento, velocidade de embalamento, momento de inércia, sentido de rotação.

As condições topográficas do sítio do aproveitamento podem ser tais que a altura de queda da água varie numa gama de valores ampla. Afim de se obter um rendimento global favorável pode-se escolher uma solução com duas velocidades de rotação. Normalmente os fabricantes possuem dados sobre a potência limite económica em função da velocidade de rotação síncrona da máquina (atendendo ao tipo de refrigeração).

n (rot/min)	1500	1000	750	600	500	428	375	333	300	273	250
1000	Vant										
750	Vant	Vant									
600	desf	desf	Real								
500		Vant	Real	Real							
428			desf	desf	Real						
375			Vant	desf	Vant						
333				desf	Real	desf	Real				
300				Vant	desf	desf	Real	Real			
273					desf	desf	desf	desf			
250					Vant	desf	Real	Vant	Vant	Real	
231						desf	desf	desf	desf	desf	Real

Vant – vantajosa; desf – desfavorável; Real – realizável (BBC; 1978)

Uma máquina eléctrica síncrona com dois escalões de velocidade consegue-se por alteração do número de pólos magnéticos da máquina – $f = p \cdot n$. Para isso utiliza-se um tipo de construção – **máquina com pólos comutáveis**.

Ver Elementos de Máquinas Eléctricas – 5.8

A rede eléctrica a que o aproveitamento está ligado tem influência na construção da máquina através de parâmetros directos – potência aparente, factor de potência; através de fenómenos importantes – queda de tensão admissível, condições de estabilidade, modo de funcionamento, regulação potência–frequência; e através da filosofia de exploração – redundâncias, disponibilidade, funcionamento como compensador síncrono.

Podem ainda ser impostas algumas especificações para o projecto do motor alternador: avaliação das perdas, escalão de tensão, aquecimento limite, e as Normas a utilizar.

Importante para a definição de alguns aspectos construtivos, essencialmente os que estão ligados ao circuito magnético rotórico é a escolha do método de arranque como motor síncrono a adoptar por cada grupo de máquinas.

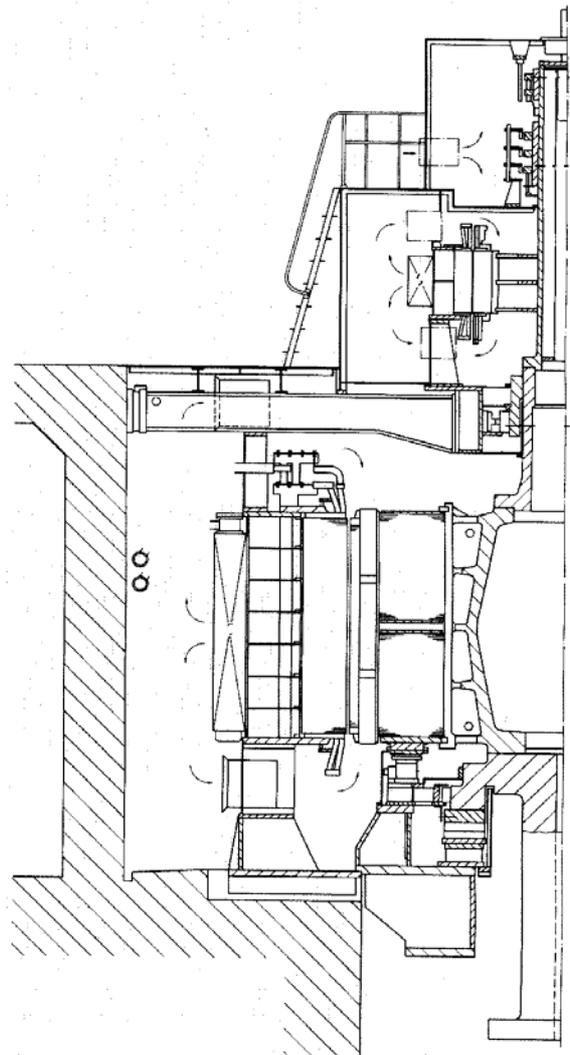
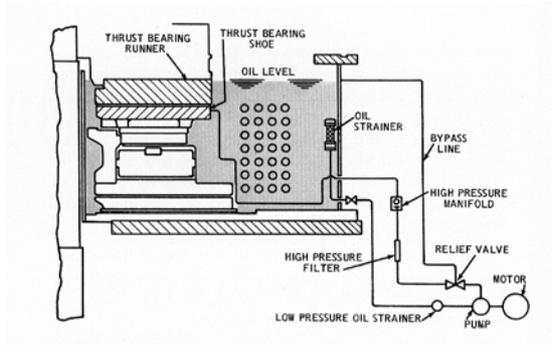
Desde que sejam conhecidas algumas das imposições de projecto, aqui referidas, pode-se escolher o método de arranque como motor síncrono atendendo a que:

Método de arranque	Imposições da rede eléctrica	Complexidade técnica
<i>motor auxiliar</i>	<i>reduzidas</i>	<i>elevada</i>
<i>síncrono</i>	<i>reduzidas</i>	<i>elevada</i>
<i>assíncrono</i>	<i>elevada</i>	<i>reduzida</i>

Actualmente existem programas de computador que permitem prever o comportamento de determinadas grandezas significativas, durante o arranque de um motor síncrono, face aos aspectos construtivos (que têm influência em parâmetros importantes – reactâncias e constantes de tempo). O resultado da aplicação desses programas, apresentados normalmente na forma gráfica, permitem seleccionar o tipo construtivo dos pólos magnéticos.

Ver Métodos de Arranque do Motor Síncrono – 2.3 assimetria eléctrica do rotor

Relacionado com as manobras de arranque, há um aspecto construtivo importante – sistema de lubrificação dos mancais. Para reduzir o atrito no momento em que se inicia o movimento do rotor a zona dos mancais é lubrificada com óleo bombeado a alta pressão. Existe por isso uma instalação de lubrificação electro-hidráulica, que forma um sistema de circulação externo, que tem de ser devidamente controlada {normalmente existem elementos duplicados para assegurar um serviço permanente do sistema}.



Motor-alternador: 281,5 MVA, 11 kV, 50 Hz, 375 rot/min. Motor auxiliar de indução: 16,5 MW, 11 kV, 428,6 rot/min

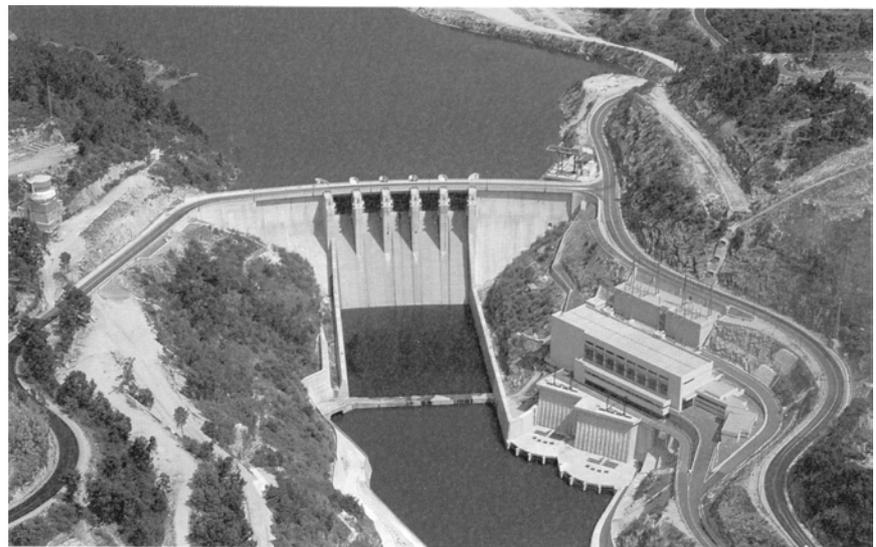
(BBC, 1978);

4.5 – O Aproveitamento Hidroeléctrico do Torrão

Este aproveitamento hidroeléctrico equipado com grupos de máquinas reversíveis encontra-se no rio Tâmega 3,5 km a montante da confluência desse rio com o rio Douro (Entre os Rios). {conforme uma publicação da EDP – Electricidade de Portugal, 1989}

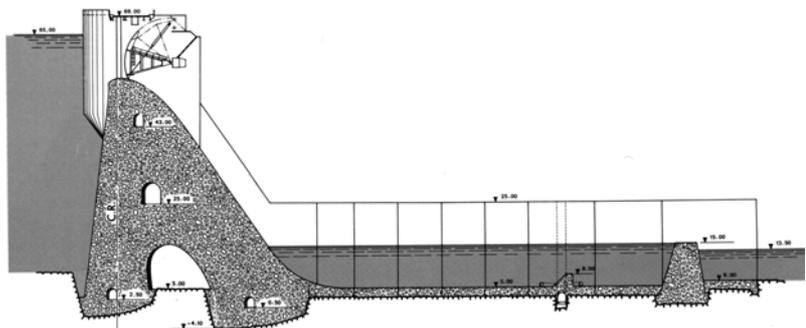


A construção deste aproveitamento ocorreu entre 1980 e 1988, tendo entrado o segundo grupo em serviço industrial em Março de 1989.



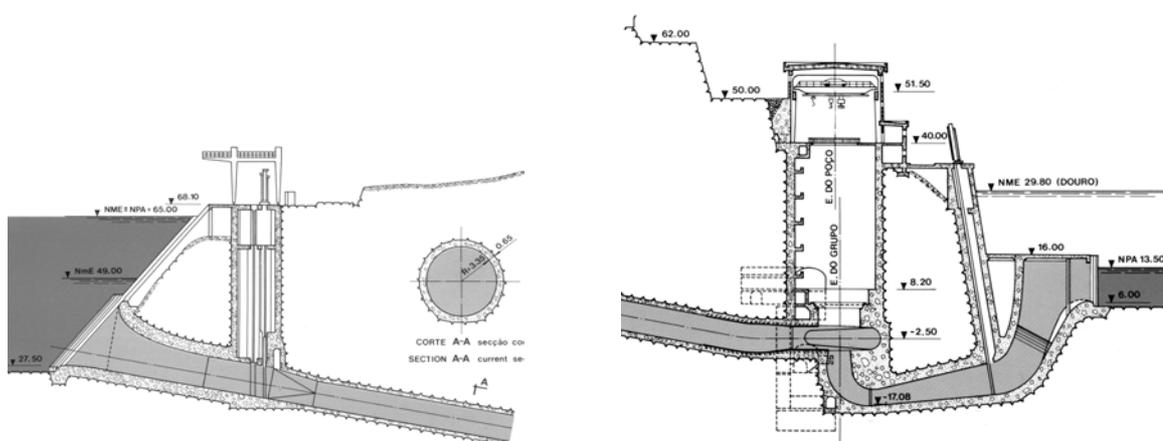
O aproveitamento hidroeléctrico do Torrão tem dois grupos de máquinas reversíveis, 2 x 73,15 MW, e está previsto para uma produtibilidade em ano médio de 233 GWh.

A barragem, do tipo gravidade aligeirada, cria uma albufeira a montante com 650 ha, desenvolvendo-se ao longo de 30 km, sendo planeada para recreio e desporto. A restituição (ou tomada de água em bombagem) da água é feita na albufeira da barragem Crestuma-Lever (rio Douro).

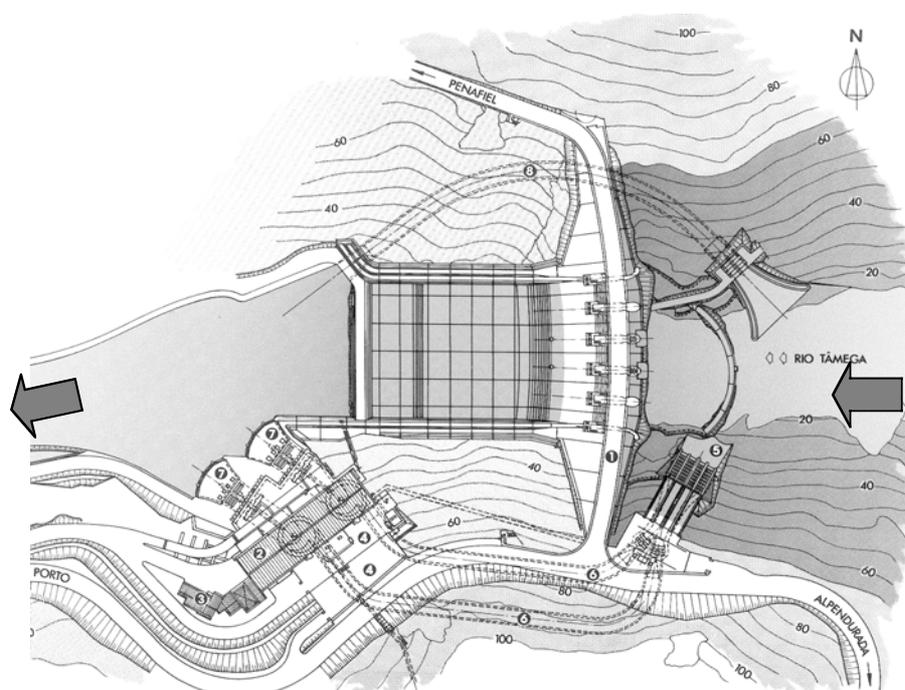


O circuito hidráulico é

constituído por uma única tomada de água (situada na margem esquerda do rio imediatamente antes da barragem) a partir da qual se desenvolve uma galeria de carga (150 m e 200 m) para cada grupo com uma inclinação de 17,5%.



A central está na margem esquerda do rio imediatamente a jusante da barragem. Está equipada com dois grupos constituídos por uma bomba-turbina Francis reversível de eixo vertical, e por um motor-alternador.



O arranque do motor síncrono é feito pelo método — *arranque com motor auxiliar* — encontrando-se directamente acoplado ao grupo motor-alternador bomba-turbina um motor de indução trifásico com rotor bobinado (8,3 MVA, 10 kV, 50 Hz, $\lambda = 0,665$)

- As características da Bomba-Turbina são:
Francis reversíveis de eixo vertical; 73,15 MW, (t 74,28 – b 74,45 MW), 125 rot/min, (t 161 – b 165,4 m³/s), (t 52,1 – b 53,8 m)
- As características do Motor-Alternador são:
trifásico de eixo vertical; 80 MVA, 10 kV, $\lambda = 0,9$ i, 50 Hz, 125 rot/min

A subestação, dotada com dois transformadores trifásicos, de 90 MVA, 10/230 kV, está instalada junto ao edifício da central.

A construção deste aproveitamento criou uma albufeira que ameaçava nas suas anteriores localizações alguns monumentos (património cultural) tornando-se necessário reinstalá-los em condições de segurança.

5 — Elementos de Máquinas Eléctricas

O estudo do problema do arranque do motor síncrono necessita da revisão de alguns conceitos de Máquinas Eléctricas.

5.1 — Máquina Eléctrica n - m

Na aplicação da Teoria Generalizada das Máquinas Eléctricas é norma pedagógica iniciar o estudo por uma máquina rotativa com um enrolamento no estator e outro enrolamento no rotor, e depois demonstrar que uma máquina mais complexa, com n enrolamentos no estator e m enrolamentos no rotor, é regida pelo mesmo tipo de equações fundamentais (matriciais), [WOO-1] [CCC-1] :

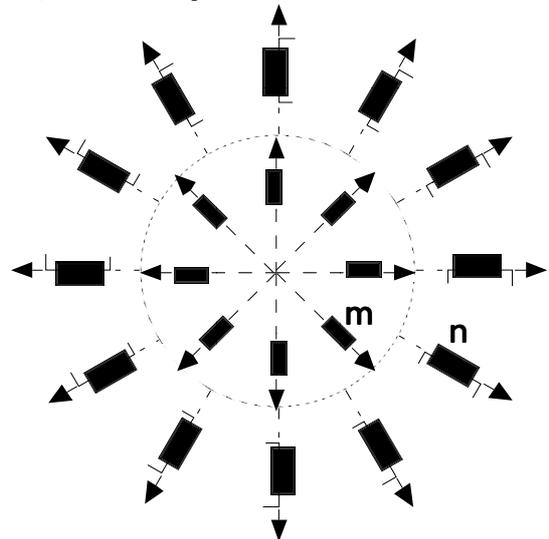
$$\text{magnética} - \{\phi\} = [L] \cdot \{i\}$$

$$\text{eléctrica} - \{u\} = [R] \cdot \{i\} + p([L] \cdot \{i\}) \quad \text{com} \quad p = d/dt$$

$$\text{electromecânica} - T = (1/2) \cdot \{i\}_T \cdot [G] \cdot \{i\} \quad \text{com} \quad [G] = d[L]/d\alpha$$

Na actualidade vive-se uma situação em que as máquinas eléctricas utilizadas são bifásicas ou trifásicas. Todas as soluções em que, no passado, se aplicaram máquinas eléctricas com um maior número de fases acabaram por ser abandonadas {em 1970 surgiu a ideia de utilizar um sistema hexafásico para melhorar a utilização do espaço no transporte de energia eléctrica}. Também o estudo das máquinas trifásicas pode ser reduzido ao estudo de uma máquina com dois circuitos em quadratura, através da aplicação de um conjunto de transformadas, que permitem fazer o estudo de uma máquina real com um modelo fictício mais simples — *máquina primitiva segundo dois eixos* — e retornar os valores obtidos como resultado à situação real. Essas transformadas podem ser generalizadas a mais circuitos, ou a mais fases, ou a mais eixos de simetria (referenciais).

No entanto no desenvolvimento da Teoria Generalizada das Máquinas Eléctricas houve uma altura em que as considerações habituais foram aplicadas a uma máquina com diversos circuitos independentes no estator (n) e diferentes do número de diversos circuitos independentes existentes no rotor (m). Este modelo, que considera que a máquina é representada por um conjunto de circuitos eléctricos ligados pelo campo magnético, em *coordenadas de fase*, é regido por um conjunto de equações que, na sua forma matricial, são do mesmo tipo das equações fundamentais da máquina primitiva.



5.2 — Modelização com Correntes de Foucault

Durante o funcionamento das máquinas eléctricas existem porções de material ferromagnético e dos condutores eléctricos sob acção de um campo magnético variável; devido ao movimento relativo das massas metálicas e do campo magnético ou à variação no tempo do campo magnético.

Como resultado desta acção de indução magnética surgem nas massas metálicas circulações de correntes eléctricas (turbilhões de correntes eléctricas) — *correntes de Foucault* — que podem ter de ser incluídas no modelo da máquina eléctrica.

Como a presença das correntes de Foucault resulta do estabelecimento na massa do metal de micro-circuitos eléctricos fechados onde se induzem forças electromotrizes devido à variação do

campo magnético, pode-se representar cada um desses micro-circuitos por um circuito eléctrico fechado com uma resistência eléctrica e com ligação magnética aos diferentes circuitos eléctricos da máquina.

A respectiva equação eléctrica será do tipo:

$$u_x = 0 = R_x \cdot i_x + L_x \cdot p i_x + L_{xy} \cdot p(i_x \cdot i_y)$$

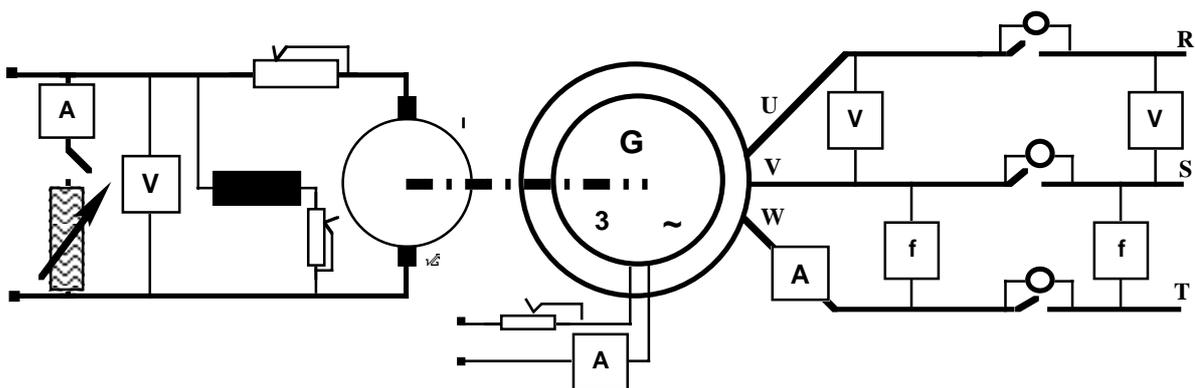
considerando-se todos os coeficientes de indução mútua L_{xy} (ou M_{xy}) das ligações magnéticas efectivamente existentes.

5.3 — Sincronização de Fases

Durante o funcionamento das máquinas eléctricas síncronas existe a necessidade de estabelecer uma ligação em paralelo de duas máquinas ou a ligação em paralelo de uma máquina com uma rede eléctrica. Nesta última situação a rede eléctrica é suposta ser de *potência infinita* — quando a máquina síncrona estiver ligada em paralelo com a rede funcionará com uma frequência constante e com uma tensão constante (os valores da rede).

A ligação de uma máquina síncrona trifásica a uma rede eléctrica geral obedece a um conjunto de condições — *condições de sincronismo de fases* — que devem ser verificadas no momento da ligação:

- igualdade da amplitude das tensões nos terminais de ligação;
- igualdade de frequência dos dois sistemas de tensão;
- igualdade de ordem de sucessão de fases.

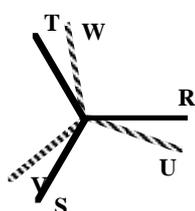


A igualdade da amplitude da tensão obtém-se depois de excitar a máquina síncrona e detecta-se pela medida da tensão nos seus terminais, ou pela diferença de tensão entre os terminais da rede e da máquina síncrona (voltímetro diferencial ΔU).

A igualdade de frequência das grandezas eléctricas é obtida por actuação na máquina primária que deverá accionar a máquina síncrona até à velocidade de sincronismo — velocidade relacionada com a frequência da rede eléctrica pelo número de pares de pólos da máquina $f = p \cdot n$. Pode-se utilizar na montagem de medida dois frequencímetros ou um frequencímetro diferencial (Δf).

Na obtenção da igualdade de frequências pode ser aproveitado o efeito estroboscópico {ver LME –efeito estroboscópico}

A igualdade de ordem da sucessão de fases é imposta porque o esfasamento entre as duas tensões nos terminais de ligação cria uma situação de desigualdade de potenciais eléctricos nos pontos de ligação.



Considerando um sistema trifásico simétrico de tensão nos terminais da rede R,S,T (representado pela estrela dos fasores de tensão simples que se deslocam com uma velocidade angular igual à pulsação das tensões ω_{rst}) e uma sistema trifásico simétrico de tensão nos terminais da máquina síncrona U,V,W, (representado pela estrela dos fasores de tensão simples que se deslocam com uma velocidade

angular igual à pulsação das tensões ω_{UVW}) verifica-se que a igualdade de ordem de sucessão de fases implica que o valor da tensão entre os terminais (U_{RU} , U_{SV} , U_{TW}) tenha a mesma variação nas três fases — anulando-se no momento em que se dá a sobreposição dos fasores homólogos (e estando as lâmpadas apagadas).

A verificação da ordem de sucessão de fases e a detecção do momento de ligação dos circuitos pode ser feita com o auxílio de lâmpadas interligando os terminais, existindo dois tipos de ligação {ver LME – sincronização}.



Se a instalação eléctrica tiver um carácter definitivo, a ordem de sucessão de fases pode ser estabelecida definitivamente durante a montagem, e o momento de sincronização de fases, durante a sincronização, pode ser detectado apenas por uma lâmpada.

Conforme o exemplo de uma antiga instalação eléctrica (1915)

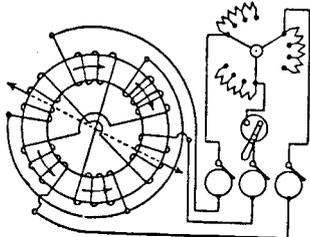
Numa montagem com carácter definitivo também poderia ser utilizado um sincronoscópio para detecção do momento de ligação em paralelo das máquinas síncronas {note que o sincronoscópio é um aparelho de medida caro}.

5.4 — Fenómeno de Görge

O fenómeno de Görge ocorre no motor de indução trifásico com impedância rotórica desequilibrada — situação de assimetria das características do circuito eléctrico de cada fase rotórica do motor.

Em 1896 Hans Görge publicou um artigo onde comunicou a ocorrência de um fenómeno anormal no comportamento de um motor de indução trifásico de rotor bobinado com uma fase do induzido aberta — *o motor desenvolve o mesmo binário para duas velocidades diferentes correspondendo uma ao regime normal e a outra correspondente a metade da velocidade normal.*

Experimentalmente verifica-se que um motor de indução trifásico com o rotor bobinado, funcionando com duas fases rotoricas curto-circuitadas e a outra fase aberta (basta levantar a respectiva escova do anel), arranca e fica a funcionar a uma velocidade próxima da velocidade de sincronismo (baixo deslizamento); se nessas condições se aplica uma sobrecarga ao motor (aumento do binário resistente), a velocidade cai imediatamente para metade do valor, o rotor continua a rodar como se o sincronismo ocorresse a meia velocidade de sincronismo. Verifica-se ainda que se o motor for accionado, pela carga mecânica, a uma velocidade superior a esse semi-sincronismo ele funciona como *gerador*, e sem excitação, mas com os enrolamentos do estator ligados à rede eléctrica a quem fornece corrente eléctrica, e de onde recebe energia reactiva.



Note que o estudo do fenómeno de Görge dos motores de indução trifásicos inserido no estudo do arranque dos motores síncronos é devido à possibilidade de ocorrência desse fenómeno durante o arranque assíncrono de um motor síncrono, através da alimentação dos circuito estatórico por um sistema de tensões trifásico, servindo o circuito indutor rotórico como circuito induzido, mas tendo as propriedades electromagnéticas de um circuito monofásico

Nesta situação, durante o arranque do motor síncrono, este fica estabilizado ("aninha") a meia velocidade, não atingindo a velocidade de sincronismo de fases !

Neste estudo interessa portanto apenas o caso em que o motor de indução trifásico tem um circuito rotórico monofásico curto-circuitado sobre uma resistência eléctrica.

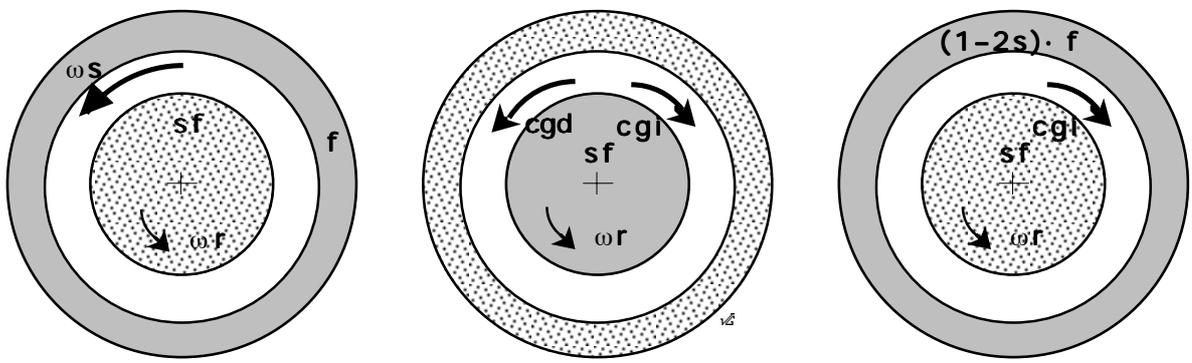
Perante a assimetria eléctrica do circuito rotórico da máquina pode utilizar-se como método de

análise o *Método das Componentes Simétricas*.

O circuito eléctrico estatórico, sendo simétrico e alimentado por um sistema de tensões trifásico simétrico com uma frequência constante f , cria um campo magnético girante à velocidade síncrona e no sentido directo.

Quando o rotor da máquina está em movimento, no circuito rotórico induz-se uma força electromotriz com uma frequência igual ao produto do deslizamento pela frequência das grandezas estatóricas $s \cdot f$. Como o circuito eléctrico rotórico está fechado, nele vai circular uma corrente eléctrica alternada com uma frequência $s \cdot f$. Esta corrente eléctrica alternada percorrendo os condutores rotóricos cria uma força magnetomotriz alternada, que cria um campo magnético alternado decomponível em dois campos iguais girantes em sentido contrário: um campo rotórico girante directo e um campo rotórico girante inverso.

Caracterizando o movimento rotativo, relativamente ao estator, pelo deslizamento s o rotor roda, no mesmo sentido do campo girante, a uma velocidade (fracção da velocidade de sincronismo) igual a $(1 - s)$.



campo rotórico girante directo

O campo magnético associado ao campo rotórico de força magnetomotriz directo roda no sentido directo, relativamente ao estator, com uma velocidade igual à velocidade de sincronismo, igual à velocidade do rotor $(1 - s)$ mais a velocidade do campo directo relativamente ao rotor (s) . Este campo magnético girante (rodando no sentido directo) induzirá forças electromotrices no circuito estatórico com uma frequência f , tudo se passando como se o circuito directo do motor fosse um circuito simétrico.

campo rotórico girante inverso

O campo magnético girante associado ao campo rotórico de força magnetomotriz inverso roda, relativamente ao estator, com uma velocidade igual a $(1 - 2 \cdot s)$ no sentido inverso, igual à velocidade do rotor $(1 - s)$ mais a velocidade do campo inverso relativamente ao rotor $(-s)$. Este campo magnético girante (rodando no sentido inverso) induzirá forças electromotrices inversas (ordem de sucessão) no circuito estatórico equilibrado, com uma frequência $(1 - 2 \cdot s) \cdot f$.

Como a impedância do circuito estatórico para esta frequência é muito elevada, pode considerar-se que as correntes com essa frequência ficam no circuito estatórico do motor de indução, porque a fonte de alimentação curto-circuita todas as frequências diferentes da frequência fundamental da rede f .

Assim, um desequilíbrio no circuito rotórico (uma fase aberta, o que equivale a um circuito rotórico monofásico) provoca:

- correntes eléctricas desequilibradas nos enrolamentos rotóricos à frequência $s \cdot f$:
- correntes eléctricas equilibradas no estator a duas frequências — a frequência fundamental f , e uma frequência subharmónica $(1 - 2 \cdot s) \cdot f$ que depende da velocidade do motor.

Para o deslizamento $s = 0,5$, correspondente a metade da velocidade de sincronismo, resulta que

a frequência $(1 - 2 \cdot s) \cdot f$ é nula e a essa frequência o campo magnético girante inverso criado no rotor é estacionário relativamente ao estator, pelo que não induz forças electromotrizes de frequência $(1 - 2 \cdot s) \cdot f$ no circuito estatórico; e não circularão correntes com essa frequência no circuito estatórico.

o binário

Continuando a utilizar o Método das Componentes Simétricas o binário no veio do motor resulta da composição do binário directo produzido pelo sistema directo de grandezas eléctricas e magnéticas e o binário inverso produzido pelo sistema inverso de grandezas eléctricas e magnéticas. O sistema homopolar sendo formado por grandezas síncronas não contribui para o efeito electromecânico. Dependendo do grau de assimetria eléctrica do circuito rotórico pode surgir um binário alternado devido à interacção de grandezas dos dois sistemas, produzindo vibrações no motor, mas sem qualquer contributo para o binário resultante no veio da máquina porque o seu valor médio será nulo.

Convém agora atender às leis gerais utilizadas na electromecânica:

- ◇ o campo magnético girante criado pelas **correntes estatóricas** produz um binário mecânico na mesma direcção desse campo magnético girante — de forma a reduzir a velocidade relativa entre o campo girante e os condutores (Lei de Lenz);
- ◇ o campo magnético girante criado pelas **correntes rotóricas** produz um binário mecânico na direcção contrária à desse campo magnético girante — para equilibrar o binário mecânico que se desenvolve nos condutores do estator mergulhado no interior de um campo magnético girante criado pelas correntes do rotor, que tem o sentido desse campo magnético girante, tem de se desenvolver no rotor um binário com o sentido contrário ao do binário estatórico e do campo magnético girante (Lei de Newton — acção– reacção).

A componente directa do binário actua no sentido de deslocamento do rotor — sentido directo — de forma a reduzir a velocidade relativa do campo girante e dos condutores (Lei de Lenz).

Velocidade	Deslizamento	Sentido do Binário	
		DIRECTO	INVERSO
$< \omega_s/2$	$> 0,5$	directo	directo
$\omega_s/2$	$0,5$	directo	zero
$(\omega_s/2)^+$	$0,5^-$	directo	? ! ? ! ?
$(\omega_s/2)^+ < w < \omega_s$	$0,5 > s > 0$	directo	inverso
ω_s	0	zero	zero
$> \omega_s$	< 0	directo	inverso

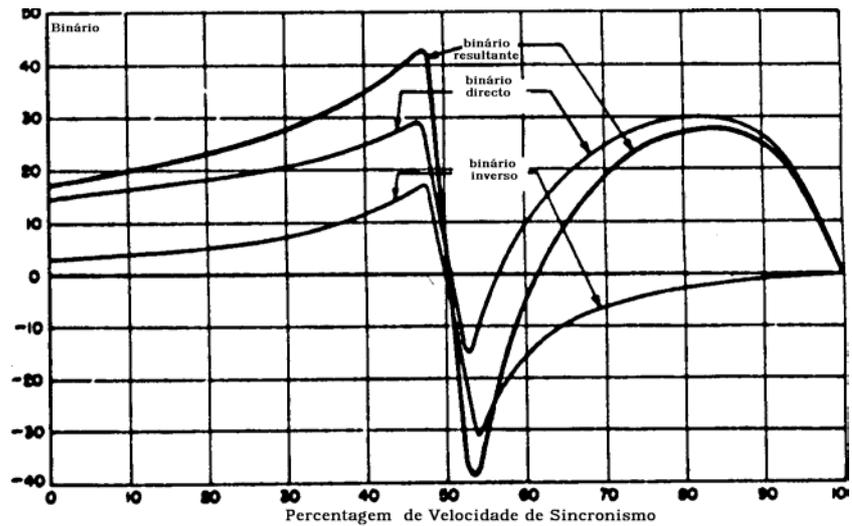
A componente inversa do binário a velocidades inferiores a metade da velocidade de sincronismo campo magnético desloca-se no sentido contrário ao movimento do rotor — sentido inverso — e desenvolve-se um binário com o sentido directo no rotor para equilibrar o binário com o sentido inverso que se desenvolve no estator, como forma de diminuir a velocidade relativa entre o campo e os condutores do estator .

Pelos mesmos motivos para metade da velocidade de sincronismo a componente inversa do binário será nula.

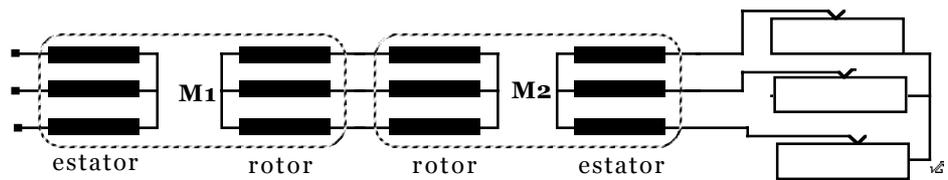
Para velocidade ligeiramente superiores a metade da velocidade de sincronismo $(\omega_s/2)^+$ o binário depende das características eléctricas dos circuitos rotórico e estatórico, sendo difícil prever o seu andamento.

Para velocidades superiores a metade da velocidade de sincronismo o binário actuará no sentido contrário ao do movimento do rotor (sentido inverso). Normalmente a componente inversa do binário adicionar-se-á à componente directa do binário até metade da velocidade de sincronismo e contrariará a componente directa do binário para velocidades superiores a metade da

velocidade de sincronismo.



O comportamento do motor de indução trifásico com um circuito rotórico monofásico é análogo ao de dois motores de indução trifásicos iguais ligados em cascata.



5.5 – O Binário Oscilatório

O desenvolvimento do binário mecânico na máquina síncrona quando está a arranque como máquina assíncrona (motor de indução) pode ser estudado seguindo o trabalho de C. Concordia. Considerando que a máquina síncrona tem um momento de inércia suficientemente grande para que a aceleração durante o arranque seja pequena, que a velocidade é constante e suave, o sistema trifásico de tensões de alimentação é sinusoidal e a máquina não está excitada mas o circuito indutor está curto-circuitado ($U_f = 0$); tudo se passa como se o regime de funcionamento fosse um regime permanente.

A velocidade do rotor ω_r , que varia lentamente, em cada instante é dada por $d\alpha_r/dt = (1 - s) \cdot \omega_s$, em que s é o deslizamento do rotor, relativamente à velocidade de sincronismo (ω_s) correspondente à frequência da tensão de alimentação. Nessa situação, atendendo a que a velocidade de sincronismo é numericamente igual à pulsação do sistema de tensões de alimentação (ω), é $\omega_r = (1 - s) \cdot \omega_s = (1 - s) \cdot \omega$.

Como o ângulo eléctrico de posição é $\alpha = \omega_r \cdot t + \alpha_0$, resulta que $\alpha - \omega t = -s\omega t + \alpha_0$. Trata-se de um regime permanente assíncrono.

O sistema de tensões de alimentação, que constitui um sistema directo equilibrado, e o sistema de correntes eléctricas de alimentação, são:

$$\begin{aligned}
 u_a &= \sqrt{2} \cdot U \cos(\omega t) & i_a &= \sqrt{2} \cdot I \cos(\omega t - \varphi) \\
 u_b &= \sqrt{2} \cdot U \cos(\omega t - (2\pi/3)) & i_b &= \sqrt{2} \cdot I \cos(\omega t - \varphi - (2\pi/3)) \\
 u_c &= \sqrt{2} \cdot U \cos(\omega t + (2\pi/3)) & i_c &= \sqrt{2} \cdot I \cos(\omega t - \varphi + (2\pi/3))
 \end{aligned}
 \tag{5.5-1}$$

A aplicação da transformada de Park, $[C_p]$, ao sistema de grandezas eléctricas de alimentação

permite obter o sistema de grandezas estatóricas reduzidas ao referencial do rotor $\{r; d, q, o\}$.

$$\begin{aligned} u_d &= U_d(t) = \sqrt{2} \cdot U \cos(\omega t - \alpha_0) & i_d &= I_d(t) = \sqrt{2} \cdot I \cos(\omega t - \alpha_0 + \varphi) \\ u_q &= U_q(t) = -\sqrt{2} \cdot U \sin(\omega t - \alpha_0) & i_q &= I_q(t) = -\sqrt{2} \cdot I \sin(\omega t - \alpha_0 + \varphi) \\ u_o &= U_o = 0 & i_o &= I_o = 0 \end{aligned} \quad (5.5-2)$$

Na aplicação da transformada de Park utilizou-se como matriz de transformação (não ortogonal e não invariante de potência)

$$[C_p] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha_r & \cos(\alpha_r - 2\pi/3) & \cos(\alpha_r + 2\pi/3) \\ -\sin \alpha_r & -\sin(\alpha_r - 2\pi/3) & -\sin(\alpha_r + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

Como resultado importante da aplicação desta transformação de Park:

- o valor da amplitude das tensões e das correntes eléctricas transformadas (U_d e U_q) e (I_d e I_q) corresponde ao valor máximo das tensões de fase e ao valor máximo das correntes de fase, porque de (5.5-2) resulta: $(\sqrt{2} \cdot U)^2 = (U_d^2 + U_q^2)$ e $(\sqrt{2} \cdot I)^2 = (I_d^2 + I_q^2)$.
- não existe a componente homopolar das grandezas eléctricas;
- as outras componentes das grandezas eléctricas — directa ou longitudinal e em quadratura ou transversal — são funções sinusoidais do tempo com uma pulsação ω .

A aplicação da transformada de Park ao fluxo magnético totalizado ψ , conduz ao mesmo resultado: as grandezas segundo o eixo longitudinal e segundo o eixo transversal são funções sinusoidais do tempo com uma pulsação ω . No entanto continuam ligados à intensidade de corrente eléctrica por equações diferenciais lineares.

Assim a aplicação da transformada de Park traduziu-se pela substituição dos circuitos estatóricos por circuitos rotóricos capazes de criarem os mesmos efeitos magnéticos. Em regime permanente, como o que está a ser estudado, as grandezas físicas associadas têm o mesmo tipo de comportamento que as grandezas rotóricas: são constantes para a velocidade de sincronismo ($s = 0$), têm a pulsação ω quando a velocidade é nula ($s = 1$) e têm a pulsação $s\omega$ nas velocidades intermédias.

Sem corrente de excitação, e com uma velocidade constante, as equações reduzidas dos circuito estatóricos do motor síncrono têm a forma (tomando $\alpha_0 = 0$, porque o regime é permanente pode-se escolher o instante inicial):

$$\begin{aligned} u_d &= R_s \cdot i_d + p \cdot \psi_d - \omega_r \cdot \psi_q & R_s \cdot i_d + p \cdot \psi_d - (1-s) \cdot \omega \cdot \psi_q &= U_m \cos(\omega t) \\ u_q &= R_s \cdot i_q + p \cdot \psi_q + \omega_r \cdot \psi_d & R_s \cdot i_q + p \cdot \psi_q + (1-s) \cdot \omega \cdot \psi_d &= -U_m \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (5.5-3)$$

E a expressão do binário electromotor é:

$$T_{el} = k \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d)$$

Atendendo a que durante a variação da velocidade desde a velocidade nula até à velocidade de sincronismo as grandezas eléctricas e magnéticas têm uma variação sinusoidal no tempo com uma pulsação $s\omega$, pode-se utilizar o *Método Simbólico* [MCB-1] — representando por fasores das grandezas com variação sinusoidal no tempo e aplicando as regras da álgebra dos números complexos — no tratamento das equações de funcionamento da máquina eléctrica. Assim o problema fica reduzido ao estudo de um conjunto de circuitos eléctricos ligados pelo campo magnético em corrente alternada sinusoidal.

No Método Simbólico as grandezas alternadas sinusoidais, cujo valor instantâneo é da forma — $a(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$ — é representada simbolicamente pelo número complexo $\underline{a} = A \exp(j(\omega t + \varphi))$. trata-se de um fasor que roda com uma velocidade angular igual à pulsação ω e faz com o eixo real (Re) um ângulo φ no instante $t = 0$. Considerando que o operador $\exp(j\omega t)$ é responsável pelo movimento rotativo

provocado pelo aumento com o tempo do ângulo de fase φ , conclui-se que $\underline{a} = A \exp(j(\omega t + \varphi)) = \underline{A} \exp(j\omega t)$, com o fasor $\underline{A} = A \exp(j\varphi)$ ou $\underline{A} = A \angle \varphi$.

Desta forma uma grandeza alternada sinusoidal $a(t)$ é representada simbolicamente pelo fasor \underline{A} , e o seu valor instantâneo é dado por $a(t) = \text{Re}[\underline{A} \cdot \exp(j\omega t)]$

Nesta situação as equações de funcionamento assíncrono do motor síncrono (5.5-3), são representadas pelas equações simbólicas, atendendo a que o operador diferencial $p = d/dt$ é substituído por $js \cdot \omega$, que $u_d = U_m \cos(s\omega t)$ é representado pelo fasor \underline{U} , e que $u_q = -U_m \sin(s\omega t) = -U_m \cos(s\omega t + (\pi/2))$ é representado por $-j\underline{U}$:

$$\begin{aligned} R_s \cdot \underline{I}_d + j s \cdot \omega \cdot \underline{\Psi}_d - (1-s) \cdot \omega \cdot \underline{\Psi}_q &= \underline{U} \\ R_s \cdot \underline{I}_q + j s \cdot \omega \cdot \underline{\Psi}_q + (1-s) \cdot \omega \cdot \underline{\Psi}_d &= -j\underline{U} \end{aligned} \quad (5.5-4)$$

Os fluxos magnéticos totalizados podem ser relacionados com as correntes eléctricas segundo os respectivos eixos através das **indutâncias operacionais** $\underline{L}_d(j\omega)$ e $\underline{L}_q(j\omega)$.

$$\underline{\Psi}_d = \underline{L}_d(j\omega) \cdot \underline{I}_d \quad \text{e} \quad \underline{\Psi}_q = \underline{L}_q(j\omega) \cdot \underline{I}_q \quad (5.5-5)$$

Como no estudo das máquinas síncronas pela Teoria Generalizada as principais preocupações são com as grandezas estatóricas, costumam-se simplificar as equações fundamentais eliminando as correntes rotóricas. Actuando dessa forma há um momento em que os fluxos totalizados são determinados apenas como funções das grandezas estatóricas:

$$\underline{\Psi}_d = \underline{G}(p) \cdot u_f + \underline{L}_d(p) \cdot i_d \quad ; \quad \underline{\Psi}_q = \underline{L}_q(p) \cdot i_q \quad ; \quad \underline{\Psi}_o = \underline{L}_o(p) \cdot i_o$$

em que $G(p)$, $L_d(p)$ e $L_q(p)$ são funções do operador derivada p ($p = d/dt$). As funções, $L_d(p)$ e $L_q(p)$ são as indutâncias operacionais.

Neste estudo, como $U_f = 0$ resulta que não se utiliza $G(p)$. Como a variação das grandezas é sinusoidal $p = js\omega$.

Resolvido o sistema de equações (5.5-4) em ordem a \underline{I}_d e \underline{I}_q e determinado $\underline{\Psi}_d$ e $\underline{\Psi}_q$ através de (5.5-5) poder-se-ia determinar o valor do binário médio $T = \kappa \text{Re}[\underline{\Psi}_d^* \cdot \underline{I}_q - \underline{\Psi}_q^* \cdot \underline{I}_d]$.

Alguns autores para determinarem as expressões necessárias simplificam as equações desprezando a resistência do estator R_s . No entanto, atendendo à situação real das máquinas pode ser conveniente considerar aquela resistência.

Procurando, apenas, expressões de carácter geral, determinam-se os valores instantâneos das correntes e dos fluxos totalizados, considerando as propriedades dos fasores representativos das grandezas sinusoidais $\{a(t) = \text{Re}[\underline{A} \cdot \exp(j\omega t)]\}$:

$$\begin{aligned} i_d &= \text{Re}[\underline{I}_d \cdot \exp(js\omega t)] = a \cdot \cos(s\omega t) - b \cdot \sin(s\omega t) \\ i_q &= \text{Re}[\underline{I}_q \cdot \exp(js\omega t)] = c \cdot \cos(s\omega t) - d \cdot \sin(s\omega t) \\ \psi_d &= \text{Re}[\underline{\Psi}_d \cdot \exp(js\omega t)] = e \cdot \cos(s\omega t) - f \cdot \sin(s\omega t) \\ \psi_q &= \text{Re}[\underline{\Psi}_q \cdot \exp(js\omega t)] = g \cdot \cos(s\omega t) - h \cdot \sin(s\omega t) \end{aligned}$$

o que permite determinar o binário instantâneo como:

$$\begin{aligned} T_{el} &= (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) = (e \cdot \cos(s\omega t) - f \cdot \sin(s\omega t)) \cdot (c \cdot \cos(s\omega t) - d \cdot \sin(s\omega t)) - \\ &\quad - (g \cdot \cos(s\omega t) - h \cdot \sin(s\omega t)) \cdot (a \cdot \cos(s\omega t) - b \cdot \sin(s\omega t)) \\ T_{el} &= (1/2)[((ce - ag) + (df - hb)) + \\ &\quad + ((bg + ah - ed - cf) \cdot \sin(2s\omega t) + (ce + bh - df - ag) \cdot \cos(2s\omega t))] \end{aligned}$$

resultando que o binário instantâneo é formado por duas componentes:

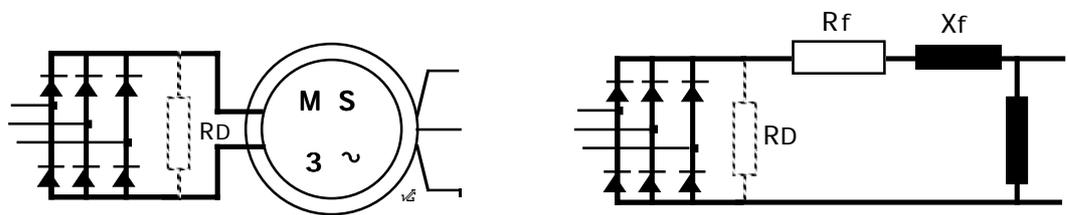
- um **binário médio** $(1/2)((ce + dg) - (ah - bk))$ que está disponível para acelerar a máquina, e é produzido pelo circuito indutor (curto-circuitado) e pelo enrolamento amortecedor;

- um *binário oscilatório* — da forma $A \cdot \sin(2s\omega t) + B \cdot \cos(2s\omega t)$ — com uma pulsação dupla da pulsação das grandezas rotóricas — $2 \cdot (s\omega)$ — que é produzido pelas assimetrias eléctrica e magnética do circuito rotórico. Note-se que as correntes eléctricas associadas ao binário oscilatório são responsáveis pelo aparecimento de tensões harmónicas indesejadas na rede de alimentação, aumentando o efeito nefasto sobre a rede de alimentação devido ao arranque da máquina.

Atendendo ao que está escrito sobre o fenómeno de Górges em 5.4 verifica-se a necessidade de considerar a resistência estatórica R_S , porque é ela que condiciona o valor da corrente no circuito estatórico resultante da acção do campo magnético girante inverso que se desloca com uma velocidade $(1-2s)\omega_S$.

5.6 — Díodos no Circuito Indutor

O desenvolvimento de elementos semicondutores para electrónica de potência levou a que o circuito indutor das máquinas síncronas passasse a ser alimentado por uma unidade rectificadora (com ou sem escovas).



Surge, então, a situação dos díodos permanecerem intercalados no circuito indutor *durante* o arranque assíncrono de uma máquina síncrona. Nesta situação as características de funcionamento da máquina alteram-se e torna-se necessário atender a duas consequências importantes:

- ⊙ o aparecimento de uma sobretensão nos terminais dos díodos durante a ocorrência de um fenómeno transitório (curto-circuito; sincronização defeituosa; funcionamento assíncrono) envolvendo a máquina síncrona;
- ⊙ a criação de um novo binário oscilatório, à frequência de deslizamento s_f , e a alteração do comportamento do binário assíncrono.

sobretensão

Durante o arranque assíncrono de uma máquina síncrona com excitação sem escovas, o circuito indutor da máquina síncrona está fechado sobre a ponte de díodos, mas pode ocorrer a interrupção da alimentação da excitação do pequeno alternador que alimenta a ponte rectificadora — a máquina síncrona fica a funcionar em regime assíncrono com ligação do circuito do induzido a uma rede eléctrica (ou outra máquina síncrona, ou ondulator) e o circuito indutor tem intercalados os díodos da ponte rectificadora.

O movimento do rotor torna-se bastante irregular porque o binário síncrono só actua em cada meia alternância da força electromotriz induzida no circuito do indutor.

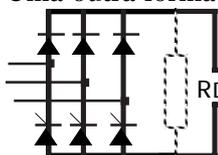
Continuando a máquina a ter o circuito induzido alimentado por um sistema trifásico de tensões, existe no entreferro uma campo magnético girante que é responsável pelo aparecimento de uma força electromotriz alternada monofásica com a frequência de deslizamento s_f no circuito eléctrico do indutor. Em cada semi-período em que os díodos estão a conduzir o binário electromotor contém uma componente síncrona e uma componente assíncrona de frequência dupla da frequência de sincronismo; o deslizamento da máquina síncrona atinge os 0,0016 se a máquina anteriormente estivesse sincronizada $s = 0$. No semi-período seguinte, em que os díodos estão contrapolarizados e não conduzem, desaparece a componente síncrona do binário, surge um desequilíbrio das forças magnetomotrizes e o rotor acelera consideravelmente (tudo se

passa como se o circuito indutor estivesse aberto); o deslizamento atinge 0,0153 se a máquina anteriormente estivesse sincronizada $s = 0$. Porque o deslizamento é elevado, e também é elevada a velocidade relativa do campo girante e os condutores do rotor, neles se induzem forças electromotrizes que são responsáveis pelo aparecimento de uma sobretensão nos terminais dos díodos.

Um exemplo conhecido é de um máquina síncrona de 37,5 MVA com rotor cilíndrico, com excitação electrónica em que experimentalmente ocorreu uma sobretensão de 700 V no circuito indutor. Nas máquinas com roda polar a sobretensão é mais elevada se a máquina anteriormente estiver sincronizada $s = 0$. Uma forma de proteger os díodos consiste em colocar uma resistência em paralelo com a ponte rectificadora R_D . Uma resistência de $2 \cdot R_f$ a $5 \cdot R_f$ será suficiente para proteger os díodos.

Existem vários esquemas com circuitos de comando que permitem curto-circuitar a resistência de protecção da ponte ou abrir o circuito dessa resistência depois da sincronização da máquina eléctrica com a rede.

Uma outra forma de protecção utilizada contra a sobretensão no circuito do indutor consiste na aplicação de uma ponte rectificadora semi-comandada (três tiristores e três díodos). Os tiristores têm apenas uma função de comutação — impedem o aparecimento de corrente contínua no enrolamento do campo durante o arranque e permitem desbloquear a ponte rectificadora para a corrente contínua em funcionamento normal.



binário oscilatório (sf)

Durante o arranque assíncrono de uma máquina síncrona com uma ponte de díodos no circuito do indutor protegida por uma resistência R_D ($R_D \approx 10 \cdot R_f$) e alimentada por uma fonte de corrente alternada trifásica, apesar da força electromotriz induzida no circuito indutor pelo campo magnético girante presente no entreferro ser alternada, devido aos díodos a corrente eléctrica tem apenas um sentido de circulação.

Para a situação de arranque assíncrono da máquina síncrona, a presença dos díodos da ponte rectificadora no circuito indutor, tem a seguinte influência no comportamento da máquina:

- ⊗ criação de um novo binário oscilatório com uma frequência de deslizamento sf ;
- ⊗ alterações no comportamento do binário assíncrono.

Como a alimentação em corrente alternada trifásica da ponte rectificadora continua activa, resulta que no circuito indutor circula uma corrente eléctrica que tem uma componente contínua I_f . Mas devido à alimentação do circuito estatórico, existe um campo girante no entreferro que induz uma força electromotriz alternada com frequência de deslizamento sf nos condutores do circuito indutor, que será responsável pelo aparecimento de uma componente alternada da corrente eléctrica no circuito indutor $i_{fa}(t)$.

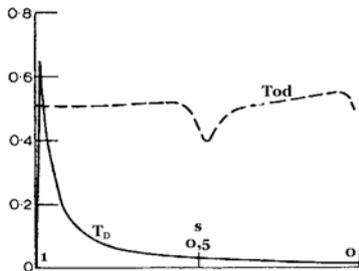
$$i_f(t) = I_f + i_{fa}(t)$$

Conforme o circuito de rectificação adoptado pode-se dar uma de duas situações:

- não existe uma resistência R_D de protecção dos díodos, tornando a intensidade da componente contínua da corrente no circuito indutor igual à amplitude da componente alternada, e a corrente total no circuito indutor circulará num só sentido;
- existe uma resistência R_D de protecção dos díodos, e ter-se-á de a dimensionar de forma a que a intensidade da componente contínua da corrente no circuito indutor seja superior à amplitude da componente alternada, e a corrente total no circuito indutor circulará num só sentido.

A corrente unidireccional $i_f(t)$ actua como uma corrente de excitação criando um campo magnético rotativo com o movimento do rotor. Este campo magnético induz uma força

electromotriz nos condutores do circuito estatórico (do induzido) com uma frequência rotacional $(1-s) \cdot f$. Como a tensão de alimentação do circuito estatórico não contém componentes com esta frequência, tudo se passa como se o circuito estivesse curto-circuitado e circulará uma corrente no circuito estatórico com a frequência $(1-s) \cdot f$. Esta corrente eléctrica, que se sobrepõe à corrente de arranque, circulando no interior de um campo magnético girante dá origem ao aparecimento de um binário oscilatório T_{0d} com andamento sinusoidal e com frequência $s \cdot f$.



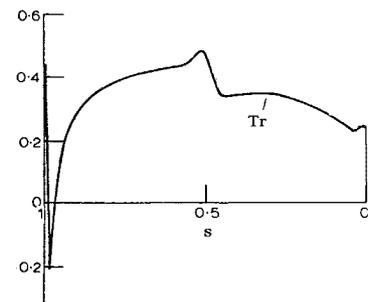
Este binário oscilatório pode assumir valores elevados no arranque ($s=1$) à tensão nominal, podendo o esforço no veio ou na ligação mecânica ultrapassar os valores limites, e impedir o arranque assíncrono naquelas condições.

No momento inicial de arranque a velocidade do rotor é pequena, e é baixa a frequência da corrente eléctrica induzida — $s \approx 1$ e $(1-s) \cdot f \approx 0$ — também será pouco elevada a indutância do circuito eléctrico e a sua impedância fica reduzida à resistência eléctrica (do circuito induzido e da rede), pelo que é elevada a intensidade da corrente eléctrica nesse circuito a essa frequência.

A circulação da corrente resultante da indução da força electromotriz no circuito estatórico pelo campo magnético indutor criado pela corrente unidireccional no circuito indutor, traduz-se pelo aparecimento de um binário de frenagem T_D (resultante da circulação da corrente estatórica no interior do campo magnético indutor criado pelo circuito indutor).

Este binário de frenagem tem uma queda brusca para os valores iniciais da velocidade, de que pode resultar um binário actuante muito baixo ou mesmo negativo, pelo que o motor síncrono pode ficar parado nestes momentos iniciais de arranque.

Este binário de frenagem — **que se deve exclusivamente à presença dos díodos** — actua conjuntamente com o binário assíncrono alterando o seu comportamento, principalmente na zona inicial de arranque. Como o binário de frenagem tem uma queda brusca para os valores iniciais da velocidade, pode resultar um binário actuante T_T muito baixo ou mesmo negativo, pelo que o motor síncrono pode ficar parado (definitivamente !) nesses momentos iniciais do arranque.



Qualquer uma destas situações — um novo binário oscilatório, a alteração do andamento do binário assíncrono — pode ser reduzido com modificações no projecto da máquina ou pode ser eliminado completamente empregando uma ponte rectificadora com tiristores.

Este estudo, com carácter meramente qualitativo, foi aqui apresentado para obtenção da compreensão dos fenómenos e para justificação de algum comportamento anómalo do sistema electromecânico durante a fase de arranque assíncrono do motor síncrono. Com as aproximações feitas — principalmente a linearização das propriedades dos materiais e das características de comportamento das relações entre grandezas físicas — e algumas outras inerentes a esta situação de funcionamento seria possível encontrar expressões aproximadas, mas que permitem o dimensionamento de uma instalação na fase de projecto.

5.7 — Binário Sincronizante

Quando o motor síncrono está a funcionar em regime permanente sinusoidal simétrico a expressão do binário síncrono é dada por (máquina de pólos salientes):

$$T_{em} = \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \cdot \left(\frac{U \cdot E_0}{X_d} \sin \delta + \left(\frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \right) \cdot U^2 \sin 2\delta \right)$$

o que mostra que o operador pode controlar a máquina através do valor da força electromotriz E_0 que pode ser alterado por variação da corrente de excitação, e pode variar a carga mecânica o que alterará o valor da intensidade de corrente absorvida pela máquina.

No momento em que um dos citados parâmetros é alterado — variação da excitação ou variação da carga mecânica — há uma variação momentânea da velocidade e há uma variação momentânea do ângulo de carga δ .

Se as condições de carga do motor síncrono forem tais que a máquina as possa suportar, quando se dá a perturbação que provoque a variação do ângulo de carga, desenvolve-se um binário que tende a restabelecer a situação de sincronismo — é o **binário sincronizante**.

Diminuindo o binário de carga, aumenta a velocidade e diminui o ângulo de carga, o que implica que surge um binário sincronizante resistente que diminui a velocidade e aumenta o ângulo de carga, numa actuação que tende a restabelecer o equilíbrio da velocidade na velocidade de sincronismo (auto-sincronização) {durante o processo é alterada a energia cinética armazenada nas massas rotóricas}.

A expressão do **binário sincronizante**, que dá uma medida da capacidade de auto-sincronização do motor, obtém-se derivando a expressão do binário síncrono em ordem ao ângulo de carga,

$$\frac{\partial T_{em}}{\partial \delta} = \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \cdot \left(\frac{U \cdot E_o}{X_d} \cos \delta + \left(\frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \right) \cdot U^2 \cos 2\delta \right)$$

Analisando esta expressão verifica-se que:

- o binário sincronizante tem um valor máximo para $\delta = 0$, o ângulo da carga é nulo quando a máquina está em vazio;
- o binário sincronizante tem um valor nulo para um valor do ângulo de carga δ

$$\cos \delta_{\max} = \frac{-E_o \cdot X_q \pm \sqrt{(E_o \cdot X_q)^2 + 8 \cdot U^2 \cdot (X_d - X_q)^2}}{4 \cdot U \cdot (X_d - X_q)}$$

dado por, . Como a reactância síncrona transversal X_q é menor do que a reactância síncrona longitudinal X_d , o ângulo de carga limite ocorre para $\delta < \pi/2$ rad elect (o valor depende da força electromotriz em vazio E_o). Este valor define o **limite de estabilidade estática** da máquina — acima desse valor limite do ângulo de carga o motor síncrono perde o sincronismo (e não o recupera).

É importante salientar dois aspectos:

- 1) o **limite de estabilidade estática** é um conceito ideal, correspondendo a uma máquina síncrona ideal. Ao caracterizar-se esse conceito pretende-se que a variação da carga mecânica é realizada de uma forma lenta e suave até àquele valor que a máquina já não pode suportar (e em que interrompe o paralelo com a rede de alimentação). Na realidade a máquina tem uma resposta em regime transitório a qualquer alteração das condições de funcionamento, que complica o funcionamento da máquina;
- 2) ao considerar-se o motor eléctrico como uma máquina síncrona considerou-se que era constante a velocidade de rotação da máquina ($n = f/p$). Mas para variar o ângulo de carga, com a situação de carga mecânica da máquina, torna-se necessário que a velocidade se altere (momentaneamente!) — dá-se um aumento do ângulo de carga quando a máquina desacelera (por aumento do binário de carga face ao binário motor) e reduz momentaneamente a velocidade. Mas durante a ocorrência deste fenómeno transitório, a **velocidade média** do rotor permaneceu constante e igual à velocidade de sincronismo — por isso se afirma que a máquina é síncrona.

5.8 — Máquina Síncrona de Pólos Comutáveis

Na aplicação da máquina síncrona como motor-alternador em aproveitamentos hidroeléctricos reversíveis surgem situações em que as características topográficas do aproveitamento implicam que seja grande a variação da altura de elevação e da altura de queda; por exemplo no aproveitamento de Ova Spin (Suíça) a variação da altura de queda é de 205 m para 70 m. Numa situação de grande variação da altura, baixa a um valor inadmissível o rendimento hidráulico

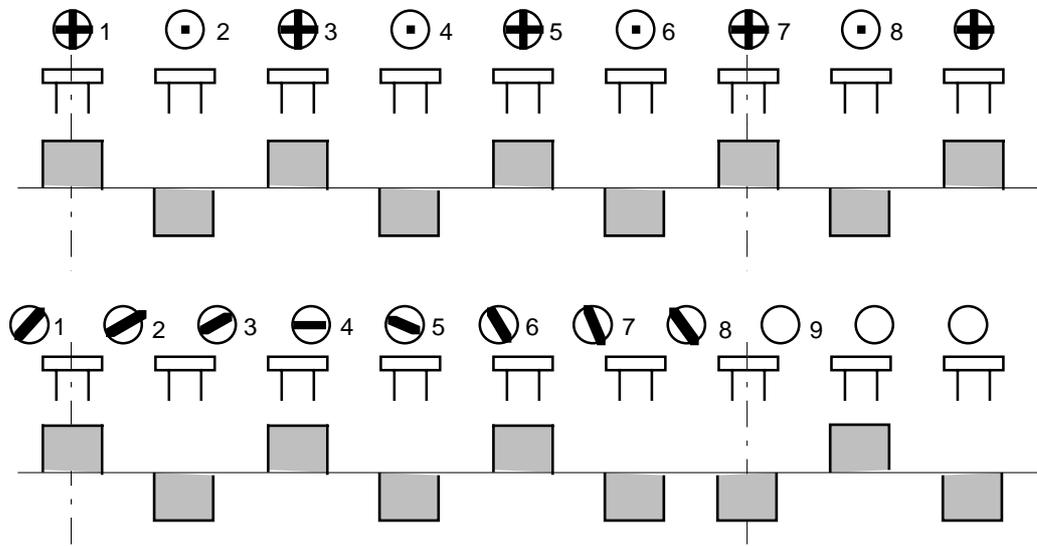
médio das bomba-turbina.

Obtém-se um rendimento hidráulico óptimo quando, para uma altura de queda quase igual à altura de elevação, a velocidade do grupo em regime de bombagem é superior em 20% ao seu valor em regime de turbinagem.

Também variações sazonais da altura de bombagem podem ser suficientes para justificar, com critérios de rendimento hidráulico, a necessidade de a máquina hidráulica ser accionada a duas velocidades diferentes.

Como as duas velocidades são marcadamente diferentes — dois escalões de velocidade — a mudança de velocidade não necessita de ser contínua, o que permite que numa máquina síncrona a alteração de velocidade se faça por alteração do número de pares de pólos — $n = f/p$. Desta forma o problema é resolvido apenas com alteração dos aspectos construtivos da roda polar e dos enrolamentos rotórico e estatórico.

Uma das primeiras soluções adoptadas — Flatiron; 60 Hz, 275 rot/min e 300 rot/min (USA, 1954) — consistiu na realização de uma roda polar com 24 pólos salientes igualmente espaçados, e excitados por um único enrolamento indutor e na utilização de dois enrolamentos estatóricos: um para 300 rot/min construído com 24 pólos magnéticos e o outro para 275 rot/min construído para 28 pólos magnéticos (enrolamento com passo polar diferente do passo polar do indutor). Na passagem para 28 pólos a ligações das bobinas indutoras são refeitas; os 24 pólos salientes são divididos em grupos de seis pólos por grupo, e a polaridade de todos os pólos no segundo e no quarto grupo são alteradas — consegue-se assim uma adição fasorial não nula das forças electromotrices geradas nos condutores das bobinas do enrolamento de 28 pólos. Para permitir este reagrupamento e recharacterização dos pólos salientes torna-se necessário que o enrolamento indutor tenha ligação à parte estática da máquina através de cinco grupos de colectores de anel-escova.



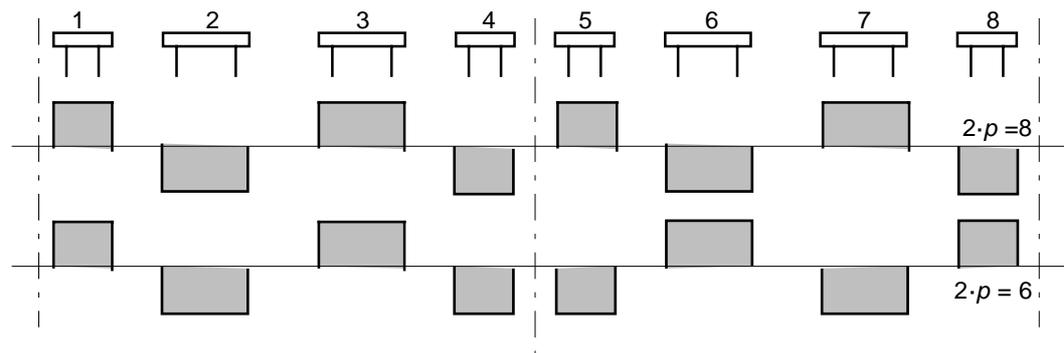
Com os dois enrolamentos estatóricos — um desenhado para 24 pólos e o outro para 28 pólos — obtém-se a alteração da velocidade e evita-se a distorção da forma de onda da força electromotriz.

Com esta solução o circuito magnético, quando funciona como máquina de 28 pólos não é eficiente, o que se traduz por um maior volume de máquina por unidade de potência.

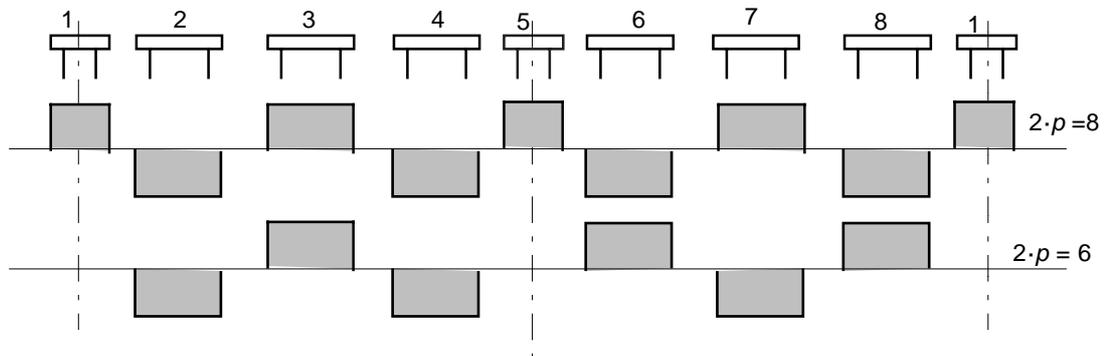
Um maior estudo sobre o desenvolvimento de um método para obter uma máquina síncrona de pólos salientes com duas velocidades mas com um único enrolamento estatórico levou ao desenvolvimento de um tipo de motor-alternador com pólos comutáveis, como os que foram aplicados no aproveitamento de Ova Spin; 50 Hz, 375 rot/min e 500 rot/min (Suíça; 1968).

A criação de uma roda polar com comutação de pólos pode ser feita por um método com um aspecto construtivo simples, mas que tem algum inconveniente.

O método simples — *comutação de grupos de pólos* — consiste em utilizar uma roda polar com um número de pólos salientes igual ao maior número de pólos (correspondente à menor velocidade), e para a maior velocidade e menor número de pólos há que eliminar magneticamente, curto-circuitando a bobina polar, um pólo num conjunto com um número par de pólos uniformemente repartidos na periferia da roda polar, ou, então, excita-se esse pólo da mesma forma que um pólo vizinho para que o conjunto dos dois pólos forme um único pólo, mas garante-se que os pólos sejam alternadamente norte sul, apesar de passarem a existir pólos com arco polar diferente (assimétricos). Para além do aumento do número de colectores de anéis-escova não há grandes alterações aos aspectos construtivos da máquina eléctrica. O inconveniente resulta de para a velocidade menor a onda de força magnetomotriz no entreferro fica distorcida surgindo harmónicos de ordem diversa da habitual.



Um outro método — *comutação do número de pólos, eliminação dos pólos individuais* — constrói-se a máquina com um número total de pólos salientes igual ao número superior de pólos necessário para a velocidade inferior, e o número de grupos de pólos é igual à diferença entre o número superior dos pólos necessários e o número inferior (velocidade superior). O número de pólos inferior obtém-se eliminando os pólos extremos pertencentes a dois grupos de pólos sucessivos, e mudando a polaridade dum grupo de pólos em cada dois.



Na selecção do método de comutação de pólos a aplicar consideram-se para comparação dos métodos a forma de onda do campo magnético indutor, aspectos de construção como a distância entre expansões polares, repartição dos núcleos polares, aspectos construtivos com influência na ventilação da máquina, assim como a complexidade do circuito de comutação.

Fundamentalmente existem os seguintes métodos para criar uma roda polar com pólos comutáveis:

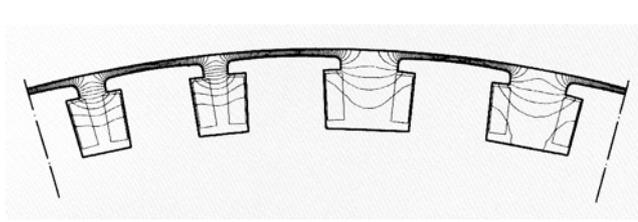
- Uma roda polar e dois enrolamentos estatóricos
- Uma roda polar com comutação de grupos de pólos
- Uma roda polar com comutação de grupos de pólos e eliminação dos pólos individuais

O enrolamento estatórico obtém-se como uma solução de compromisso, mas aplicando os

métodos avançados da Técnica dos Enrolamentos para Máquinas de Corrente Alternada. São aplicados enrolamentos com um número fraccionário de ranhuras por pólo e por fase, possuindo factores de enrolamento capazes de atenuarem os diferentes harmónicos introduzidos pela forma de onda da força magnetomotriz polar. As máquinas síncronas de potência elevada construídas têm dois enrolamentos estatóricos: um para cada velocidade.

Exemplo de Máquinas Síncronas de Pólos Comutáveis (ABB)				
<i>Central</i>	Ova Spin (CH)	Jukla (N)	Malta (A)	Pan Jia Kou (RC)
<i>Potência (MVA)</i>	27/21	48/40	70/42,5	98/97,7
<i>velocidade (rot/min)</i>	500/375	500/375	500/375	142,8/125
<i>Altura de queda (m)</i>	205/70	240/60	198/63	86/36

De uma aplicação concreta tem interesse conhecer a distribuição do campo magnético num semigrupo de pólos.



O enrolamento estatórico também deve ser construído com pólos comutáveis. Essa técnica é suficientemente conhecida porque tem aplicação nos motores de indução de duas velocidades, e onde já si atingiu a possibilidade de construir um enrolamento com comutação para uma razão qualquer entre o número de pólos.

Apesar disso no motor-alternador utilizam-se dois enrolamentos estatóricos, o que tendo o inconveniente de utilizar (para cada velocidade) apenas metade do cobre aplicado no estator da máquina e apresentar um aquecimento desigualmente distribuído, apresenta grandes vantagens nas características do enrolamento e na complexidade das ligações.

O enrolamento destinando-se a ser submetido a um campo magnético distorcido criado por uma roda polar de construção irregular, rico em termos harmónicos de ordem diversa, necessita de ter características que permitam que apenas os harmónicos de ordem ímpar — 5^a, 7^a, 11^a, 13^a ... — existam, evitando-se a interacção com os harmónicos de campo de ordem diferente, e dando origem a forças parasitas, vibrações e perdas. Também a forma de onda da força electromotriz afasta-se pouco da forma praticamente sinusoidal imposta pelas Normas. Pode-se utilizar um enrolamento com um número inteiro de ranhuras por pólo e por fase ($b' = b/(2pm)$).

Em cada ranhura existem duas barras de condutor, ficando coma forma de um enrolamento normal a duas camadas por ranhura. Os enrolamentos separados criam-se com esses condutores afectando as bobinas ao enrolamento correspondente à velocidade escolhida e criando um enrolamento a uma camada por ranhura.

Em cada ranhura existem dois lados de bobina, mas como apenas num circula corrente (para cada velocidade) resulta um aquecimento desigual e tensões mecânicas entre os dois lados de bobina.

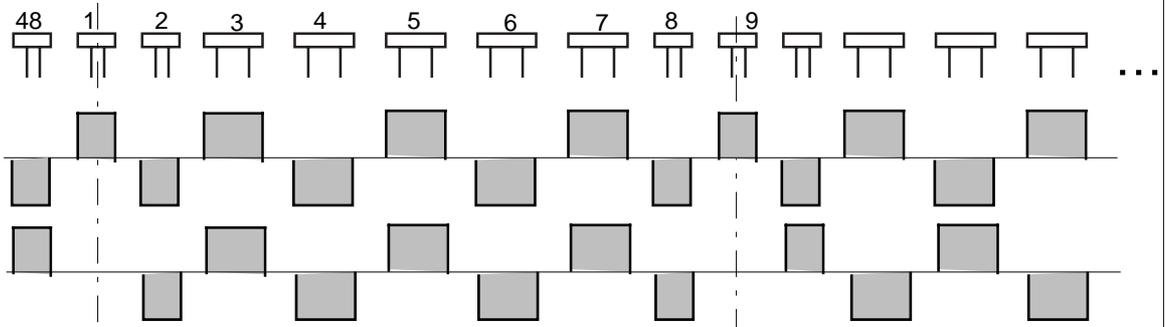
Par um determinado aproveitamento hidroeléctrico com bombagem — Pan Jia Kou, rio Luan He, China, 86m a 36 m, 1989 — foi desenvolvido um alternador motor com as seguintes características: 98 MVA / 97,7 MW, 13,8 kV, $\lambda = 0,88$ / $\lambda = 1$; 50 Hz, 125 rot/min / 142,8 rot/min (ABB, 1990).

A mudança do número de pólos do campo magnético indutor — 48 pólos e 42 pólos — é feita com alteração da largura dom arco polar e mudança de polaridade: método *de comutação de grupos de pólos e eliminação de pólos individuais*.

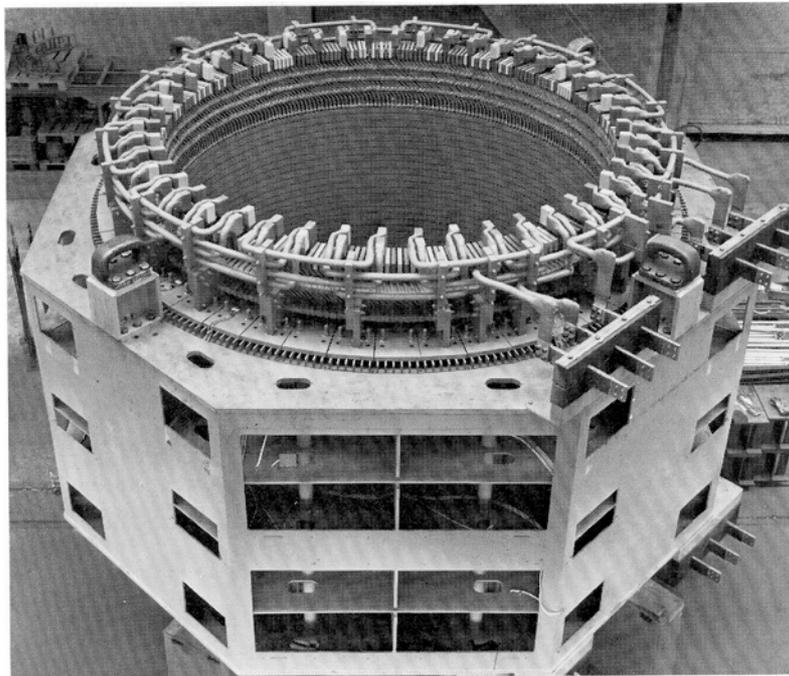
· Cada roda polar tem 6 grupos com 8 pólos (3 pólos estreitos e 5 pólos

largos)

- Obtêm-se 48 pólos criando nos 48 pólos da roda polaridade alternada (N - S)
- Obtêm-se 42 pólos mudando a polaridade de um grupo em cada dois, e o pólo médio da sucessão de três pólos estreitos é desligado.



O enrolamento estatórico é constituído por dois enrolamentos com um número fraccionário de ranhuras por pólo e por fase, sendo cada enrolamento a uma camada, mas formando o conjunto um enrolamento de bobinas disposta a duas camadas.



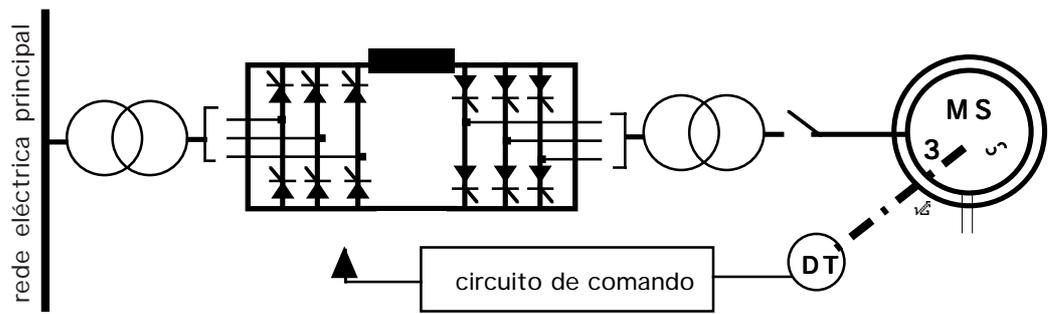
Apêndice A

Conversor de Frequência

No arranque síncrono do motor síncrono trifásico pode utilizar-se um conversor estático de frequência. Este aparelho electrónico é constituído por um equipamento capaz de absorver da rede eléctrica de alimentação energia com uma frequência constante e convertê-la em energia com uma frequência variável, o que permite arrancar a máquina síncrona até uma velocidade determinada. Quando a aplicação do motor síncrono exige uma frenagem comandada, então o conversor estático de frequência é projectado de forma a que tenha um funcionamento reversível — na frenagem uma energia a frequência decrescente produzida na máquina síncrona é devolvida à rede eléctrica de alimentação com uma frequência constante.

O conversor estático de frequência tem a possibilidade de absorver da rede a energia necessária ao arranque sem causar perturbações e de transmitir ao estator do motor síncrono que está excitado pelo circuito indutor.

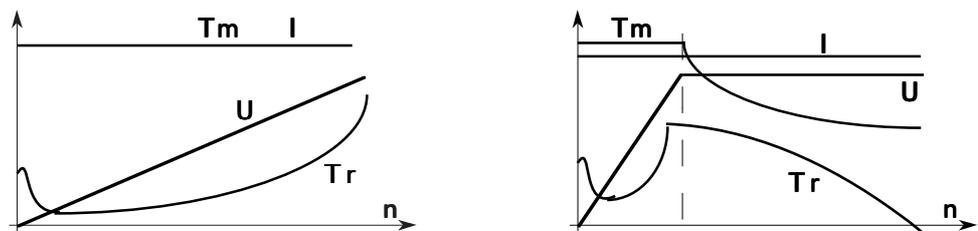
Note-se que associado ao conversor estático de frequência existe um conjunto de equipamento eléctrico que pode incluir um transformador de potência na ligação ao motor síncrono e algum material de ligação.



O conversor de frequência é constituído por um rectificador, um circuito de ligação em corrente contínua com uma bobina de filtragem, e um ondulador, além do circuito de comando e controlo.

O rectificador, formado por uma ponte trifásica completa de tiristores e tem por função injectar uma corrente eléctrica no circuito intermédio de corrente contínua no arranque do motor síncrono; na frenagem tem função de ondulador.

O circuito indutor do motor síncrono está ligado a uma outra fonte de energia eléctrica; por isso funcionamento do motor, mesmo durante o arranque é normalmente (para os motores de potência elevada) a fluxo constante. No caso de o binário resistente imposto pela carga o permitir podia-se utilizar um regime de funcionamento em tensão constante mas com enfraquecimento do campo indutor.

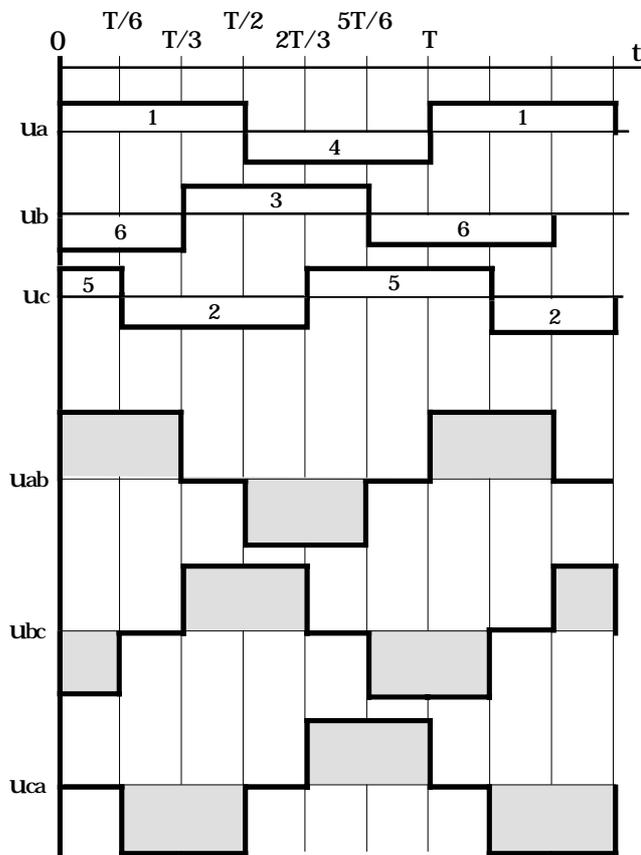
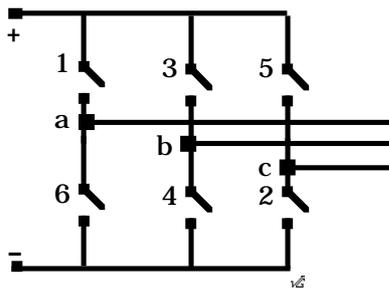
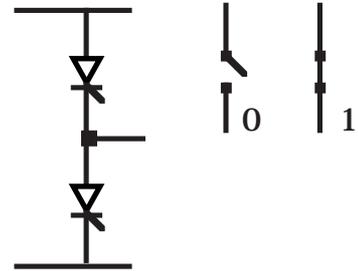


A ponte trifásica completa de tiristores do lado do motor funciona durante o arranque como ondulador. Essencialmente a comutação da corrente no ondulador é comandada pela tensão do motor síncrono e por isso as correntes nas três fases da máquina estão em atraso sobre as tensões e a máquina síncrona trabalha subexcitada; mas a baixa velocidade a comutação dos tiristores tem de ser assegurada por um circuito de comutação devido ao baixo valor da tensão nos

terminais do motor.

O circuito de potência de um ondulator em ponte trifásica está representado na figura, tendo-se indicado apenas o circuito de disparo dos tiristores. O funcionamento do circuito de disparo dos tiristores desempenha um importante papel na definição das características do ondulator, em particular da forma de onda das suas grandezas eléctricas de saída.

Como circuito electrónico o ondulator pode ser visto como um sistema formado por três unidades em semi-ponte, em que os tiristores superior e inferior de cada unidade (braço), alternadamente, entram e saem de condução. Para se estudar o funcionamento do ondulator, e se estabelecer a respectiva forma de onda das grandezas de saída, consideram-se os tiristores como comutadores ideais, com uma alteração instantânea do seu estado de condução (!...).



0	a	b	c
T/6	1	0	1
T/3	1	0	0
T/2	1	1	0
2T/3	0	1	0
5T/6	0	1	1
T	0	0	1

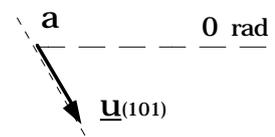
Para cada intervalo de tempo correspondente a $T/6$ ($\equiv \pi/6$ rad), a tensão instantânea em cada fase — u_a , u_b , u_c — do ondulator (idealizado) pode ser determinada atendendo ao estado de condução dos elementos semicondutores.

O funcionamento do ondulator em cada intervalo de tempo do período pode ser caracterizado pelo respectivo *fasor espacial trifásico*. Recorre-se, para isso, à definição de fasor espacial trifásico da tensão $\underline{u} = (2/3) \cdot (u_a + a \cdot u_b + a^2 \cdot u_c)$, à propriedade $1 + a + a^2 = 0$ em que $a = \exp(j \cdot (2\pi/3))$, e atribui-se um de dois estados à tensão em cada ramo — $+U \leftrightarrow 1$; $-U \leftrightarrow 0$.

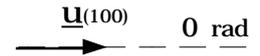
1º Intervalo: $0 < t < T/6$ (1, 0, 1)

$$u_a = U \quad u_b = -U \quad u_c = U$$

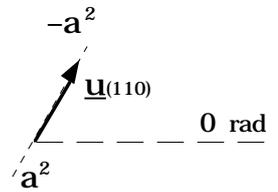
$$\underline{u}_{(101)} = (2/3) \cdot (1 - a + a^2) \cdot U = (4/3) \cdot a \cdot U$$



2º Intervalo: $T/6 < t < T/3$ (1, 0, 0)
 $u_a = U$ $u_b = -U$ $u_c = -U$
 $\underline{u}_{(100)} = (2/3) \cdot (1 - a - a^2) \cdot U = (4/3) \cdot U$

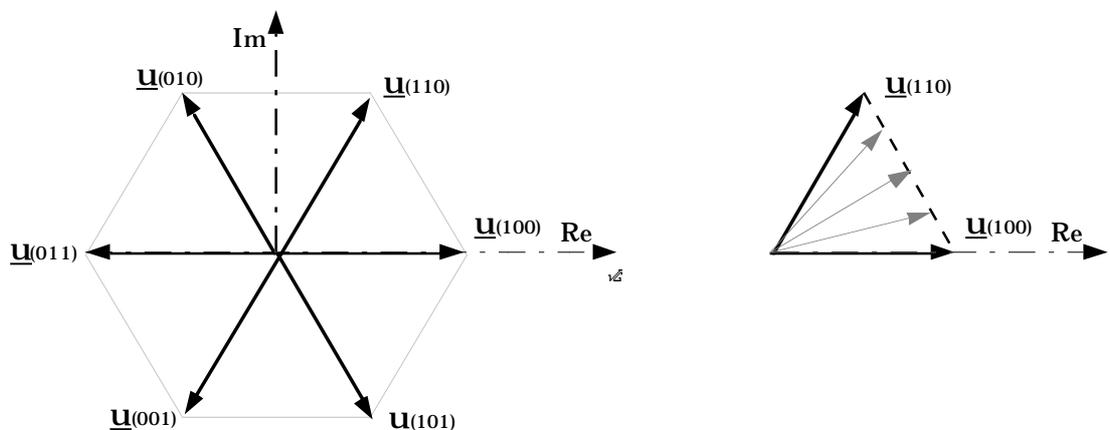


3º Intervalo: $T/3 < t < T/2$ (1, 1, 0)
 $u_a = U$ $u_b = U$ $u_c = -U$
 $\underline{u}_{(110)} = (2/3) \cdot (1 + a - a^2) \cdot U = (4/3) \cdot (-a^2) \cdot U$



Os restantes intervalos do período podem ser representados pelos vértices de um hexágono com centro na origem $\underline{u}_{(000)}$ ou $\underline{u}_{(111)}$ conforme está representado na figura.

Verifica-se que ao fim de cada intervalo de tempo, $\Delta t = T/6$, o fasor espacial trifásico salta de $\pi/3$ rad, enquanto que durante o período mantém um valor e uma posição constante.



Em regime permanente, devido à cíclica comutação dos elementos semicondutores, estabelece-se um regime periódico em que o fasor espacial trifásico da tensão passa por seis diferentes posições fixas, com medida constante, durante um sexto do período, efectuando um salto quando muda de posição.

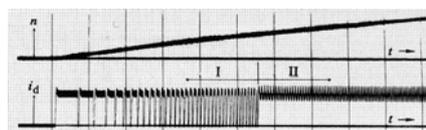
Note-se que o lugar geométrico da extremidade do fasor espacial da tensão estatórica num regime permanente sinusoidal simétrico é uma circunferência, que o fasor descreve com uma velocidade angular constante.

Quando se considera o comportamento real dos elementos semicondutores que não passam instantaneamente do estado de não condução ao estado de condução, que têm um tempo de atraso na comutação, verifica-se que o fasor espacial da tensão não “salta” de $\pi/3$ rad ao fim de cada intervalo de tempo, mas o seu extremo desloca-se ao longo de uma linha, como resultado da soma do fasor de uma tensão que está a diminuir na fase que sai de condução e do fasor de uma outra tensão cujo valor está a aumentar na fase que entra em condução.

Este estudo é representativo das modernas condições de funcionamento de um motor síncrono trifásico, mesmo na situação de arranque, alimentado por um conversor electrónico de potência em que o regime de funcionamento

é uma sucessão permanente de estados transitórios.

Este regime de funcionamento provoca um aumento das perdas de energia no motor síncrono trifásico, provoca o aparecimento de oscilações no binário electromagnético quando ocorre a comutação dos semicondutores e cria problemas de ruído (audível) e de vibrações que podem agravar a situação de arranque do motor.



Bibliografia

- [ADK-1] B. Adkins R. G. Harley; The General Theory of Alternating Current Machines, Chapman and Hall, 1975
- [AMS-1] Amândio Morim Silva; Tratamento Analítico e Experimental de Protótipos de Motores de Relutância com Nova Geometria do Rotor, FEUP, 1986
- [BAR-1] Philipe Barret; Régimes Transitoires des Machines Tournantes Eléctriques, Eyrolles, 1982
- [BLO-1] A. Blondel; Synchronous Motors and Converters; McGraw-Hill, 1913
- [CAH-1] François Cahen; Électrotechnique — tome 4: Machines Tournantes a Courants Alternatifs, Gauthier Villars, 1964
- [CCC-1] Carlos Castro Carvalho; Máquinas Síncronas, FEUP, 1971
- [CCC-2] Carlos Castro Carvalho; Complementos de Máquinas Eléctricas, FEUP, 1985
- [CEI-34.10] Comissão Electrotécnica Internacional; Machines Électriques Tournantes — Conventions Relatives à la Description des Machines Synchrone, 1975
- [CHA-1] J. Chatelain; Machines Électriques, T. 2, Dunod 1983
- [FIN-1] David Finney; Variable Frequency AC Motor Drive Systems, IEE, 1988
- [IEEE-115] Institute of Electrical and Electronics Engineers; Test Procedure for Synchronous Machines, 1983
- [KRA-1] Paul C. Krause; Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hill, 1986
- [MAI-1] M. Mainardis; Centrali Elettriche, Hoepli, 1949
- [MCB-1] Manuel Corrêa de Barros; Método Simbólico para Estudo das Máquinas Eléctricas de Corrente Alternada, Porto, 1947
- [MUR-1] J M D Murphy, F G Turnbull; power Electronic Control of AC Motors; Pergamon Press 1988
- [SAN-1] João Santana, F. Labrique; Electrónica de Potência, FCG 1991
- [SAR-1] M. Sarma; Synchronous Machines, Gordon & Breach, 1979
- [STE-1] D. D. Stephen; Synchronous Motors and Condensers, Chapman & Hall, 1958
- [SAY-1] M. G. Say; Alternating Current Machines, Pitman, 1976
- [SIL-1] Fernando Silva; Electrónica Industrial, FCG, 1998

÷ ÷ ÷ ÷ ÷ ÷

- AD(EK); Le Demarrage des Moteurs Synchrone et leur Fonctionnement, R. B. B. (8), p. 139, 1923
- P. Bandi; Moteurs-Alternateurs á pôles commutables pour la Centrale Hyydroélectrique de Ova Spin, R. B. B. (6/7), p. 297, 1970
- M. Canay; Procedés de Démarrage des Machines Synchrone, R. B. B., 54, (9), p. 618, 1967
- M. Canay; Démarrage Combiné (asynchrone-synchrone) dans les Centrales de Pompage, R. B. B., (7), p. 319, 1974
- Carlos Araújo Sá; Motores Síncronos Trifásicos – fundamentos para o estudo do seu funcionamento, FEUP, 1991
- Carlos Araújo Sá; Determinação Experimental dos Parâmetros de Máquinas Eléctricas, NEME-FEUP, 1992
- Carlos Castro Carvalho; Funcionamento a Tensão Constante da Máquina Síncrona de Pólos Salientes, ENGENHARIA, nº 32, p. 14, 1962
- J. Coenraads, S. Erikson; Frequency Convertor Starting of Large Synchronous Motors For Industrial Drives, ASEA J., 52, p. 111, 1979
- J. W. Dougherty S. H. Minnich; Operational Inductances of Turbine Generators: Test Data versus Finite-Element Calculations, IEEE paper 83 WM 188-0, 1983
- E D P; Aproveitamento Hidroeléctrico do Torrão, 1989
- Manuel S. Garrido L. Pierrat E. Djaeger; Modelling of the Satured Salient-Pole Synchronous Machine, in Electrical and Power Systems Modelling and Simulation, p. 125, IMACS, 1989
- Institute of Electrical and Electronics Engineers Committee Report; Recommended Phasor Diagram for Synchronous Machines , paper 69 TP 143-PWR, 1968
- A. Gonzalez; Computer Simulation of Semisynchronous Start of Hydroelectric Pumped Storage Units, IEEE PAS-102, (8), p. 2702, 1983
- M. D. Kankam G. R. Slemon; Time-Harmonic Analysis of Synchronous Motors, IEEE paper T 74 209-3, 1974
- P. J. Lawrenson; Theory and Performance of Polyphase Reluctance Machines, Proc. IEE, 11, (8), p. 1435, 1964
- Manuel Vaz Guedes; O Motor Síncrono Trifásico — modelização, análise de funcionamento, utilização, FEUP, 1992
- Manuel Vaz Guedes; O Alternador Síncrono Trifásico — modelização, FEUP, 1995
- Manuel Vaz Guedes; O Motor de Indução Trifásico— selecção e aplicação, FEUP, 1994
- Manuel Vaz Guedes; O Motor Síncrono de Pólos Salientes sob Controlo Vectorial, Caderno de Estudos de

Máquinas Eléctricas, nº 3, p. 5, Dezembro de 1991

Manuel Vaz Guedes; Corrente Alternada — Sistemas Polifásicos, *FEUP*, 1991

Manuel Vaz Guedes; 1936 — A Central Termoeléctrica do Freixo, *5º Encontro do Colégio de Engenharia Electrotécnica, Ordem dos Engenheiros*, p. 65, Abril de 2001

H. G. Meyer; Le Convertisseur Statique de fréquence utilisé pour le démarrage des machines synchrones, *R. B. B.*, 51, p. 526, 1964

Carlos Ferrer Moncada; Arranque Síncrono de Turbo-Alternadores, *Técnica*, 327, p. 443, 1963

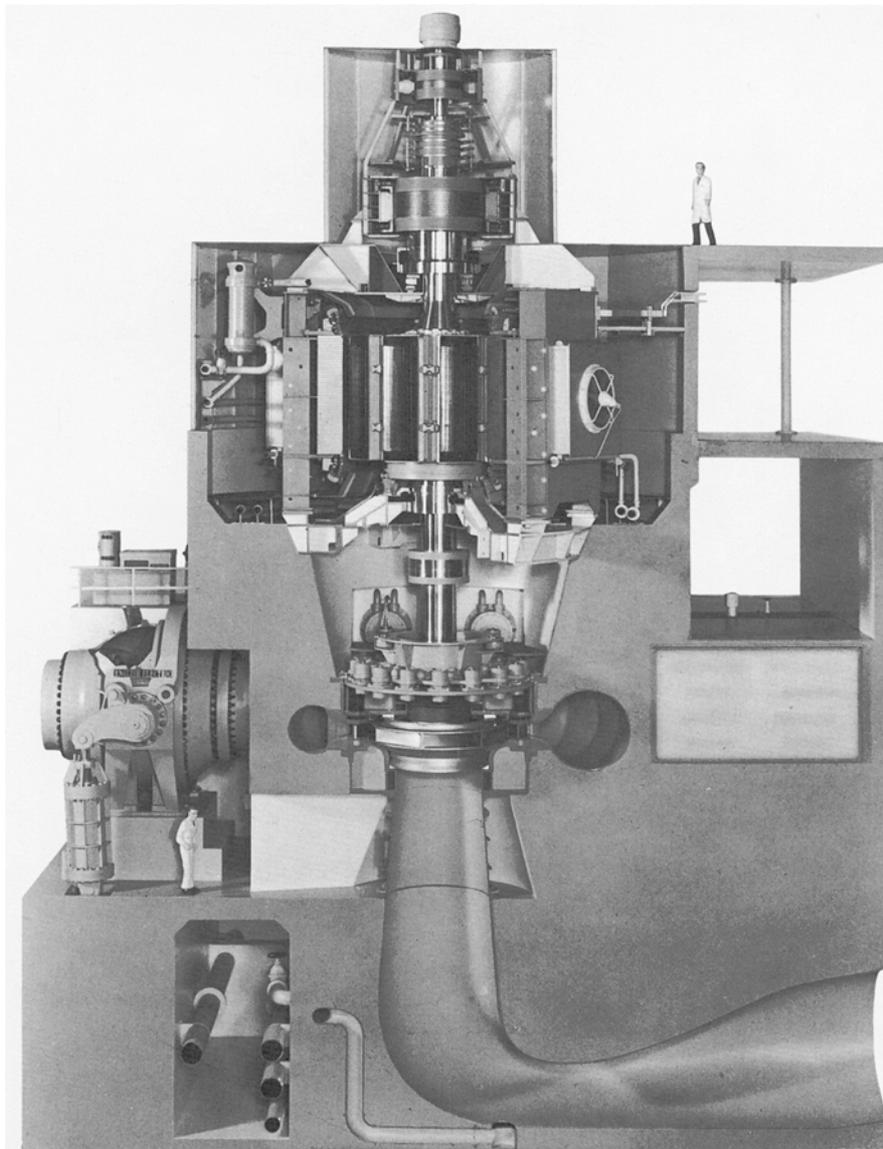
J. Nevelsteen; Starting of Large Motors — Methods and Economics, *IEEE IA-25*, (6), p. 1012, 1989

R. H. Park; Definition of an Ideal Synchronous Machine, *General Electric Revue*, 31, (6), p. 332, 1928

António Couto Soares; A evolução do sistema produtor de energia eléctrica e a sua adaptação às necessidades de energia de ponta — a bombagem nos aproveitamentos hidroeléctricos para produção de energia de ponta, *Electricidade*, 59, p. 175, 1968

F. Peneder, V. Succhanek; Dispositifs de Démarrage Normalisé, *R. B. B.*, (9), p. 607, 1978

— **MVG.02** —



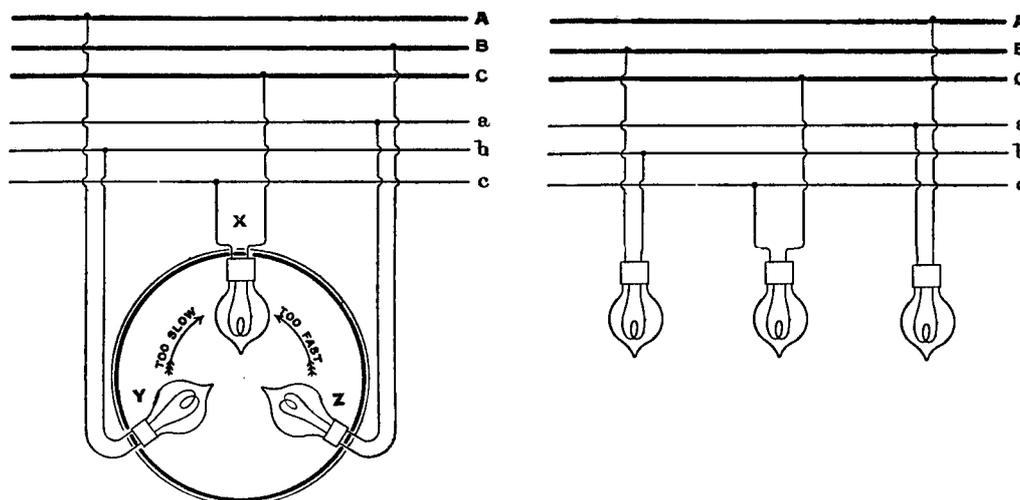
Aproveitamento hidroeléctrico com bombagem de Ben Cruachan (Escócia), 1965
(primeira bomba-turbina reversível em Inglaterra — arranque com motor auxiliar)

Símbolos para Grandezas e Unidades

GRANDEZA		UNIDADE	
comprimento	l	metro	m
massa	m	quilograma	kg
tempo	t	segundo	s
período	T	segundo	s
constante de tempo	τ	segundo	s
ângulo (plano)	α, β, γ	radiano	rad
ângulo de rotação	θ	radiano	rad
velocidade angular	ω, Ω	radiano por segundo	rad/s
força	F	newton	N
binário	T	newton metro	N·m
momento de inércia	J	quilograma metro quadrado	kg·m ²
coeficiente de atrito	D	newton metro segundo por radiano newton por metro por segundo	N·m·s/rad N/m/s
pressão	p	pascal	Pa
energia	E, W	joule	J
potência	P	watt	W
campo eléctrico	E	volt por metro	V/m
potencial (eléctrico)	V	volt	V
tensão	u, U	volt	V
força electromotriz	e, E	volt	V
capacidade	C	farad	F
intensidade da corrente eléctrica	i, I	ampere	A
densidade de corrente eléctrica	J	ampere por metro quadrado	A/m ²
campo magnético	H	ampere por metro	A/m
força magnetomotriz	F, F_m	ampere	A
indução magnética	B	tesla	T
fluxo magnético	$\psi, \phi; \Psi, \Phi$	weber	Wb
potencial vector magnético	A	weber por metro	Wb/m
coef. auto-indução	L	henry	H
coef. indução mútua	M	henry	H
resistência	R	ohm	Ω
reactância	X	ohm	Ω
impedância	Z	ohm	Ω
admitância	Y	siemens	S
relutância	R, R_m	1 por henry	H ⁻¹
potência aparente	S	volt-ampere	VA
potência activa	P	watt	W
potência reactiva	Q	volt-ampere reactivo	var
factor de potência	λ	-	-
frequência	f	hertz	Hz
pulsção	ω	radianos por segundo	rad/s
diferença de fase	φ, ϕ	radiano	rad
deslizamento	s	-	-
número de espiras	N	-	-
razão do número de espiras	n	$n = N_1/N_2$	
razão de transformação	K	$K = U_{1n}/U_{20}$	
número de fases	m	-	-
número de pares de pólos	p	-	-
número de rotações por unidade de tempo	n	rotações por segundo	rot/s
temperatura absoluta	T	kelvin	K
temperatura Celsius	t	grau Celsius	°C

— MVG.2002 —

Sincronização



Montagens de três lâmpadas para sincronização

Na aplicação das máquinas eléctricas síncronas pode existir a necessidade da máquina funcionar em paralelo com um qualquer sistema eléctrico; desde uma vasta rede eléctrica a um alternador funcionando isolado.

Um problema importante no funcionamento em paralelo de uma máquina síncrona é o da *sincronização* da máquina para estabelecimento do paralelo.

Para se efectuar o paralelo de dois sistemas de corrente alternada, em particular formados por dois alternadores síncronos trifásicos, é necessário que se verifiquem as seguintes condições:

- o valor da tensão das duas máquinas deve ser igual;
- as frequências das grandezas dos dois sistemas devem ter o mesmo valor;
- deve verificar-se a mesma sequência de fases nos dois sistemas, e
- as máquinas devem estar em sincronismo: os seus valores instantâneos de tensão em cada fase devem ser iguais e com a mesma polaridade em cada instante.

Um método expedito, e de simples concretização, que desde o início de aplicação das máquinas síncronas trifásicas se utiliza é o método das três lâmpadas.

Existe uma ligação das três lâmpadas, que estão

disposta em círculo, que permite obter uma indicação sobre a forma de conduzir a velocidade da máquina primária: nesta montagem uma lâmpada está sempre apagada, conforme existe um avanço de fase (ou um atraso de fase) do sistema trifásico do gerador assim a sequência no acender e apagar das lâmpadas se faz no sentido directo (ou no sentido retrógrado).

Numa outra montagem, com as lâmpadas em linha recta, consegue-se obter a seguinte informação:

- quando a sequência de fases é diferente, as lâmpadas acendem e apagam alternadamente; *quando a sequência de fases é a mesma as lâmpadas acendem e apagam simultaneamente*, e
- quando a sequência de fases é a mesma, as lâmpadas estão acesas quando existe diferença de tensão entre a mesma fase dos dois sistemas e *as lâmpadas estão apagadas* quando não existe diferença de tensão entre os dois sistemas — quando os sistemas estão em sincronismo.

Qualquer uma destas ligações tem sido utilizada, ao longo do tempo, para promover a sincronização de dois sistemas trifásicos de tensões. •