

Nota Técnica 003/2010

Produto: Crowbar

Aplicação: Acionamento da resistência de descarga em motores síncronos

Serão discutidos os tópicos a seguir:

1) Conceito de Motores Síncronos

2) Determinação da Resistência de Descarga

1) Conceito de Motores Síncronos

O motor síncrono é um tipo de motor elétrico muito útil e confiável com uma grande aplicação na indústria. Seu custo inicial é maior do que um motor de indução devido principalmente às características do rotor e necessidade de um circuito de sincronização. Quando a dimensão do motor é superior a 10CV o custo é relativamente pequeno em comparação aos benefícios proporcionados por este tipo de motor:

- Velocidade fixa de operação;
- Características de velocidade e torque ideais para aplicação com cargas de elevado torque e baixa rotação;
- Possibilidade de ajustar o fator de potência (FP), tornando-o indutivo, capacitivo ou trabalhando com FP unitário.

1.1) Princípio de funcionamento

O motor síncrono polifásico possui estator e enrolamento de estator (enrolamento de armadura) bastante similares aos dos motores de indução. Assim como no motor de indução polifásico, a circulação de corrente no enrolamento distribuído do estator produz um fluxo magnético com polaridade alternada norte e sul que progride em torno do entreferro numa velocidade diretamente proporcional à frequência da fonte de alimentação e inversamente proporcional ao número de pares de pólos do enrolamento.

A velocidade (física) na qual o campo magnético produzido pelo estator está girando (denominada velocidade de sincronismo ou velocidade síncrona) é dada pela fórmula a seguir:

$$w_{sinc} = \frac{120 \times f_{rede}}{P}$$

A fórmula é adequada para frequência da rede em Hertz (Hz) e valor da velocidade de sincronismo em rpm.

A maior diferença construtiva entre o motor síncrono e o motor de indução está no rotor. Os motores de indução possuem rotores construídos por barras alinhadas longitudinalmente ao estator, curto-circuitadas em suas extremidades; o motor síncrono possui enrolamentos de rotor formados por várias bobinas enroladas, e uma corrente contínua passa por elas, produzindo um campo magnético no mesmo eixo dos campos produzidos pelo estator. Assim, no motor síncrono o rotor gira para manter o pólo norte do rotor alinhado como o pólo sul do estator, conforme figura 1.

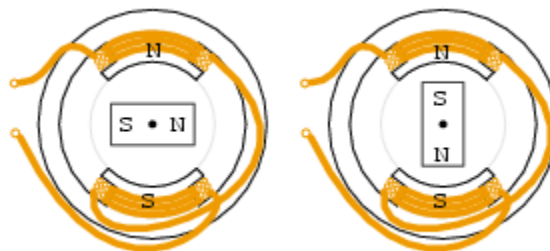


Figura 1: Alinhamento dos pólos do rotor e estator. Fonte: [5].

Os motores síncronos reais são muito mais complexos do que o modelo da figura 1. Além do mais eles podem ser de dois tipos: pólos lisos e pólos salientes. Os motores síncronos de pólos lisos não possuem ranhuras no rotor, conseqüentemente, o efeito da relutância é menor nesses equipamentos; já os motores de pólos salientes possuem ranhuras tanto no estator quanto no rotor, favorecendo o efeito da relutância. O motor da figura 1 é um motor de pólos salientes. Na figura 2 são apresentados motores síncronos trifásicos de quatro pólos nas configurações pólos salientes (fig. 2.b) quanto pólos lisos (fig. 2.c).

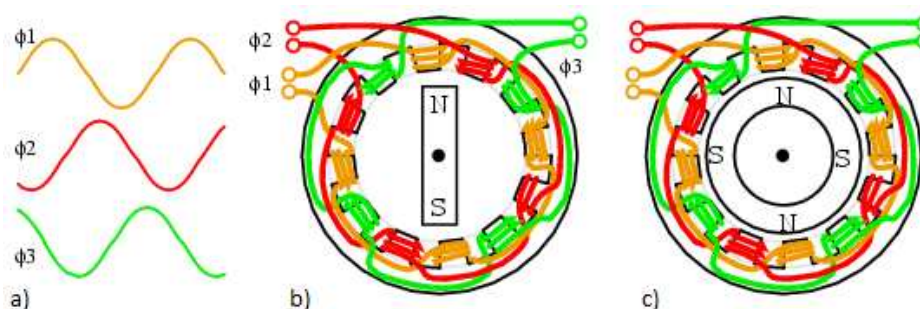


Figura 2: Motor síncrono trifásico de quatro polos. a) Sinais de tensão. b) Motor de pólos salientes. c) Motor de pólos lisos. Fonte [5].

Quando uma corrente contínua (CC) passa pelos enrolamentos do rotor, um campo eletromagnético é gerado. O torque é produzido através da força de alinhamento entre os campos eletromagnéticos do estator e rotor, conforme apresentado na figura 3. Nesta figura o pólo sul (vermelho) do rotor está inicialmente alinhado com o pólo norte (verde) do estator, assim a velocidade elétrica do rotor é igual a velocidade elétrica do estator. A velocidade mecânica depende do número de pólos da máquina e pode ser calculada, quando o motor está em velocidade síncrona, através da fórmula de w_{sinc} . Conforme se insere carga no motor, ocorre um defasamento δ entre os pólos do rotor e estator. O defasamento aumenta proporcionalmente com a carga. Quando o defasamento passar do valor máximo ocorre a perda de sincronismo, não havendo transferência de energia entre estator e rotor e, conseqüentemente, não haverá torque.

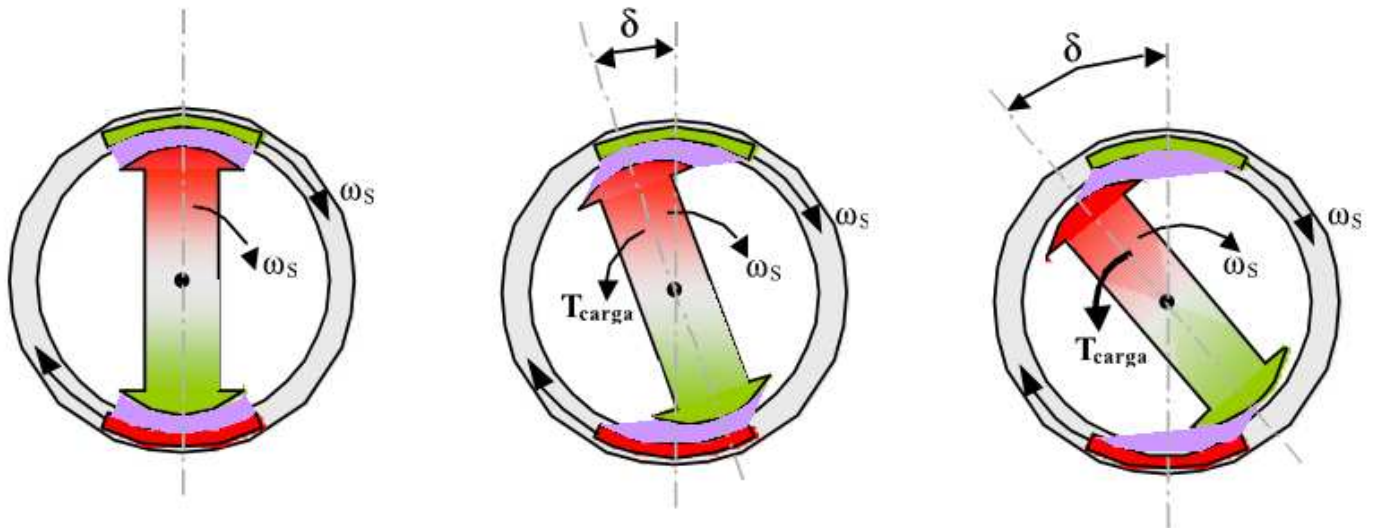


Figura 3: Princípio de funcionamento do motor síncrono. Fonte: [2].

Para se evitar a perda de sincronismo deve-se aumentar a corrente de excitação. Ajustando corretamente o valor da corrente de excitação, consegue-se controlar o fator de potência da máquina. Se a corrente de campo é exatamente suficiente para suprir a fmm necessária, nenhum componente de corrente de magnetização ou potência reativa é necessária na armadura, e o motor funciona a fator de potência unitário. Se a corrente de campo é menor do que o suficiente (i.e., o motor está subexcitado), a deficiência em fmm precisa ser suprida pela armadura, e o motor funciona a um fator de potência atrasado. Se a corrente de campo é maior do que o necessário (i.e., o motor está sobreexcitado), o excesso de fmm deve ser contrabalanceado na armadura e uma componente de corrente adiantada está presente; o motor então funciona a um fator de potência adiantado. A inversão do sentido da corrente de excitação não altera o sentido de rotação do motor. Para se inverter o sentido de giro deve-se trocar a sequência de fases do estator.

Para manter o fator de potência em um valor constante, mesmo com oscilações de carga ou da tensão da rede, deve-se utilizar reguladores automáticos de tensão. As excitatrizes Varixx são sistemas completos de excitação para motores/geradores com possibilidade de controle por fator de potência, modo DROOP, função FAR (Field Application Relay) e controle PID, além de contar com diversas proteções: perda de sinal, sobrecorrente de excitação, sobretemperatura de excitação, etc.

1.2) Partida do motor síncrono

Como não existe torque fora da frequência de sincronismo, deve-se utilizar um método auxiliar para partida do motor. Existem vários métodos de partida a saber:

- Redução da frequência de rede: com o uso de eletrônica de potência, pode-se reduzir a frequência do estator para um valor baixo (aprox. 3Hz), fazendo a sincronização do motor. Esse valor é então suavemente elevado até o valor nominal.
- Uso de motor auxiliar (pony motor): um motor auxiliar é posto em funcionamento na partida para elevar a rotação do motor até próximo da frequência síncrona.
- Partida por relutância: nos motores de pólos salientes a contribuição da relutância pode produzir torque suficiente para partir o motor, fazendo com que a velocidade se aproxime da velocidade síncrona.
- Enrolamentos amortecedores: este é o método mais amplamente aplicado na partida de motores síncronos. Utilizam-se enrolamentos de gaiola de esquilo (squirrel-cage bars) nas faces dos pólos do rotor, esses enrolamentos são os utilizados nos motores de indução. Durante a partida, somente a parte da gaiola de esquilo produz torque. Os enrolamentos amortecedores fazem com que o motor acelere até próximo da velocidade síncrona (aproximadamente 97% da velocidade síncrona). Nesta condição a corrente induzida no rotor do motor síncrono possui baixa frequência e a corrente contínua pode ser introduzida nos enrolamentos de campo, iniciando o funcionamento do motor síncrono. Deve-se tomar cuidado em não utilizar carga nominal com este método de partida, uma vez que os enrolamentos amortecedores não são projetados para suportar elevadas correntes. A figura 4 apresenta um esquemático de um motor síncrono de pólos salientes, onde é possível verificar a existência dos enrolamentos amortecedores. Na figura 5 é apresentado um motor real, com detalhe dos enrolamentos de campo e enrolamentos amortecedores.

De todos os métodos apresentados, o mais usual é o motor de pólo saliente com enrolamentos amortecedores, o que acaba por fazer uso também do efeito da relutância.

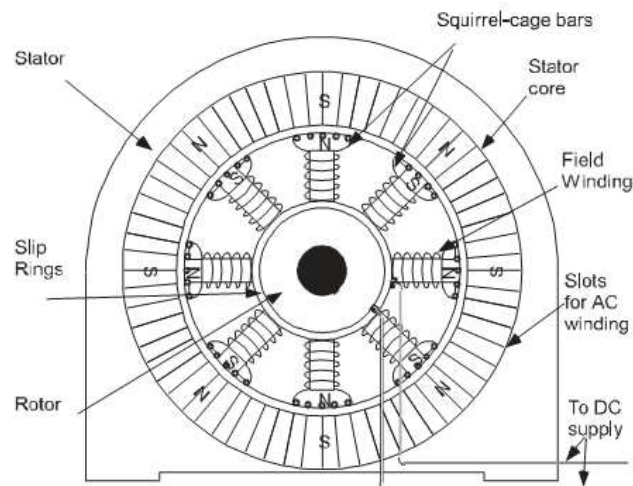


Figura 4: Motor síncrono de pólos salientes

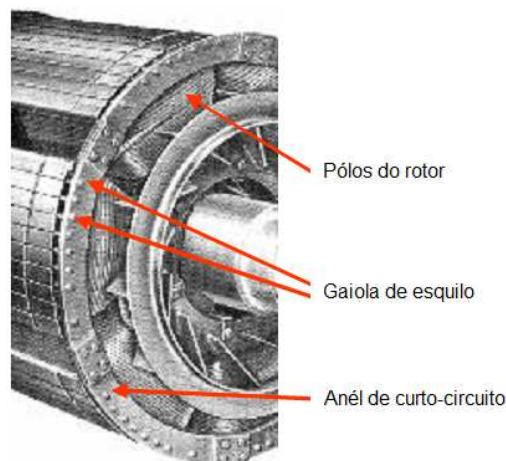


Figura 5: Detalhe dos enrolamentos amortecedores

Durante operação normal em regime não há nenhum movimento relativo entre os pólos do rotor e o fluxo magnético do estator, portanto não há indução de tensão elétrica no rotor pelo fluxo mútuo e, portanto, os enrolamentos amortecedores não produzem torque.

Para uma velocidade diferente da síncrona existe a indução eletromagnética, tanto nos enrolamentos amortecedores quanto no enrolamento de campo. Durante a partida, o enrolamento de campo deve ser desconectado da alimentação cc. Se for aplicada corrente contínua no enrolamento de campo durante a partida do motor, a interação do fluxo do estator com o fluxo do rotor causará um grande conjugado oscilante, o que pode danificar o motor.

Devido às características construtivas do motor síncrono, o enrolamento de campo contém mais espiras que o enrolamento de armadura, fazendo com que na partida a máquina se assemelhe a um transformador de corrente (TC). Se uma resistência de descarga não for utilizada, a tensão no enrolamento de campo se eleva

até que um caminho para a passagem da corrente seja obtido, o que pode ser destrutivo, chegando até a ocasionar arco voltaico.

A tensão induzida deve ser limitada, através do uso de uma resistência de descarga, de modo a não danificar a isolação do rotor ou os equipamentos (excitatriz, control box e semicondutores) conectados ao barramento CC.

Quando o rotor está com velocidade próxima a do sincronismo (entre 90% e 97%), a resistência de descarga deve ser retirada e o barramento CC energizado, iniciando a operação do motor síncrono.

Para o acoplamento da resistência de descarga durante a partida, a Varixx desenvolveu o Crowbar. Este dispositivo, o qual é acionado por tensão, permite a inserção automática de resistor de shunt em motores síncronos durante a partida, eliminando a necessidade de controle de disparo existente nos sistemas com contatores.

O Crowbar ainda garante a proteção do rotor, inserindo o resistor de descarga quando se possui oscilações de velocidade e perda de sincronismo. O Crowbar insere o resistor de shunt no sistema quando a tensão gerada no campo atinge o nível de tensão pré ajustado (230V por exemplo). Quando a tensão gerada não atinge mais este nível, não há risco para a isolação do campo do motor e o Crowbar deixa de acoplar o resistor de shunt. Durante a operação do motor, o efeito de proteção de transientes continua a ocorrer da mesma maneira.

Por ser acionado por tensão, o Crowbar Varixx pode ser utilizado como proteção contra transientes em qualquer sistema de alimentação CA ou CC. Neste caso, opera na ocorrência de um transiente de tensão, curto-circuitando a fonte de alimentação, totalmente ou para uma resistência shunt, limitando a tensão e protegendo a carga. No caso de sistemas em CC, o mesmo permanece curto-circuitado até que se corte a alimentação do sistema.

O Crowbar Varixx possui ainda, possibilidade de ajuste de nível de disparo direto (positivo), possibilidade de retardo de disparo ajustável, indicação luminosa de disparo, indicação de disparo por contato estático isolado para sinalização de CLP ou “Trip” do sistema.

2) Determinação da Resistência de Descarga

Para se calcular o valor da resistência de descarga deve-se saber a corrente induzida no rotor tanto para escorregamento unitário quanto para escorregamento próximo a zero, além do valor máximo de tensão desejada no barramento CC. Não existe norma que rege o valor máximo de tensão admissível no barramento CC, mas usualmente se utiliza uma tensão no barramento CC entre 400 e 600 V, tensão suficientemente baixa para não degradar os componentes eletrônicos utilizados na excitação desses motores.

Os valores de corrente induzida e de tensão de isolamento devem ser fornecidos pelo fabricante do motor. Caso não sejam fornecidos os valores de corrente induzida no enrolamento de campo, pode-se utilizar como regra prática um valor de resistência máxima de descarga de 2 a 5 vezes o valor de resistência do próprio rotor.

Exemplo: Um motor de 400 hp e 4000 V, 60 Hz, 10 pólos, induz uma corrente de 30A no rotor a 0% da velocidade síncrona e 16A a 97% da velocidade síncrona. Deseja-se uma tensão máxima no barramento CC de 600V.

A velocidade síncrona deste motor é: $w_{sinc} = \frac{120 \times 60}{10} = 720rpm$

$$V_{bar} = I_{induzida} \times R_{descarga}$$

$$(w = 0) \rightarrow R_{descarga} = \frac{600V}{30A} = 20\Omega$$

$$(w = 698rpm) \rightarrow R_{descarga} = \frac{600V}{16A} = 37,5\Omega$$

Um valor máximo de resistência de descarga (R_d) de 20Ω deve ser utilizado. Um valor superior resulta em uma tensão no barramento superior a 600V para $w=0$. Qualquer valor de R_d inferior a 20Ω garante uma tensão no barramento menor do que 600V para qualquer velocidade.

2.1) Limite inferior da resistência de descarga

A resistência de descarga, ao fornecer um caminho fechado entre os enrolamentos de campo, permite a existência de corrente e tensão no enrolamento de campo durante a partida do motor. Deste modo, o valor da resistência de descarga contribui para o torque de partida, conforme apresentado na figura 6.

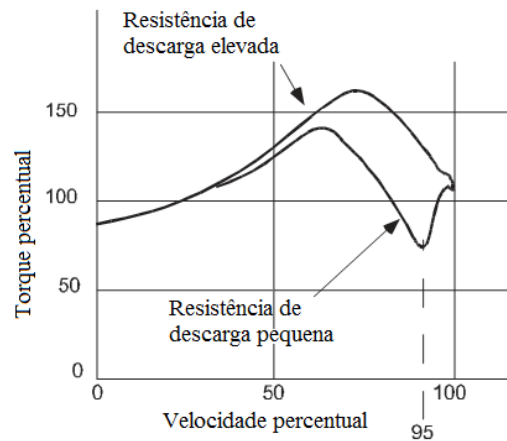


Figura 6: Variação do torque em função da velocidade para dois valores de resistência de descarga.

Um valor baixo de resistência de descarga gera um valor menor de torque enquanto um valor elevado de resistência de descarga gera um torque maior. O valor de resistência de descarga deve ser suficientemente pequeno para limitar a tensão do barramento CC ao valor pré-determinado ao passo que seja suficientemente elevado para garantir um bom torque durante a partida.

O valor ideal é aquele que resulta em máximo torque durante a partida sem ultrapassar o limite de tensão definido.



Referências

[1] GEVISA; “Notas técnicas motores”; NT-02 – Motores síncronos; site: www.geindustrial.com.br, 2010.

[2] GE Industrial Systems; “Synchronous motor protection and control”; site: www.gedigitalenergy.com, 2010.

[3] Paiva, J. E. M. S; “Motores síncronos”; Notas de aula disciplina Máquinas Elétricas; site: <http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/eduardop/MqE/Motores%20s%C3%ADncronos.pdf>, 2010.

[4] Piedade, F. R.; “Crowbar”; Boletim 118BP; site: www.varixx.com.br, 2010.

[5] Kuphaldt, T. R.; Crunkilton, D.; “Motors Guide”, Synchronous Motors, site: <http://www.electrojects.com/motors/>, 2010.

Nota Técnica escrita em Setembro de 2010.

Autor:

Eng. Marcelo Rubia da Silva – Engenheiro de Aplicação

Revisores:

Eng. Castellane Silva Ferreira – Engenheiro de Aplicação

Eng. Francis Rumenos Piedade – Diretor de Engenharia

Eng. William Maldonado – Diretor Comercial