# AULA 4

**MÁQUINAS SÍNCRONAS**

Lembrando a última aula:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Na ligação Y : ; IL = IA

Na ligação Δ : ; IL = .IA



3.5) Diagrama fasorial de um gerador síncrono

a) Indutivo (f.d.p. ↓)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| Fig 41a: Fator de potência indutivo | Fig 41b: Fator de potência resistivo | Fig 41c: Fator de potência capacitivo |

θ = ângulo de potência ou ângulo de carga

δ = ângulo de potência (torque) ou ângulo de carga

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fator de potência indutivo | Fator de potência resistivo | Fator de potência capacitivo |
| EA > Vφ cos (θ) | EA = Vφ cos (θ) | EA < Vφ cos (θ) |
| Superexcitado | Normalmente excitado | Subexcitado |

Tabela 4.1: Classificação da excitação da máquina síncrono dependo do fator de potência

**3.6) Regulação de tensão**

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.1) |



Sendo:

Vφ(vazio) : Tensão terminal por fase em Vazio .

 Vφ(PC) : Tensão terminal por fase em plena carga.

Observação: Também é possível calcular a regulação usando a tensão de linha.

Para diferentes fatores de potência, tem-se:

1. fdp indutivo : A RV é positivo e grande
2. fdp resistivo : A RV é positivo
3. fdp capacitivo : A RV é negativo a partir de certo valor de IA e fdp capacitivo.

**3.7) Determinação de parâmetros da máquina síncrona**

Dois parâmetros devem se determinados: XS e RA

Para tanto são necessários dois ensaios: Ensaio em circuito aberto e ensaio em curto circuito.

1. Ensaio em circuito aberto

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Fig 4.2.a) Ensaio em circuito aberto | Fig 4.2.b) Curva de saturação em vazio |

Procedimento:

-A máquina deve estar com os terminais em aberto (vazio)

- Aciona-se o “motor primo” (turbina no eixo) a fim que a máquina síncrona atinja a velocidade nominal.

-Aumenta-se a corrente de campo (partindo de zero) e registra-se a tensão nos terminais para se obter a curva de saturação em vazio.

Obs: Próximo da parte saturada da curva é recomendado tomar leituras mais próximos e alguns pontos acima da tensão nominal (10% ou até 20%, mas a leitura deve ser rápida para não danificar o isolamento)..

1. Teste em curto-circuito

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Fig 4.3.a) Ensaio em curto circuito | Fig 4.3.b) Característica em curto-circuito |

Procedimento:

-A máquina deve estar com os terminais em curto circuito.

- Aciona-se o “motor primo” a fim que a máquinas síncronas atinja a velocidade nominal. Inicialmente a corrente de campo da máquina síncrona deve ser zero.

-Aumenta-se a corrente de campo *If* e se registra a corrente de armadura, IA,CC (corrente de curto-circuito) até a corrente nominal para se obter a característica de curto-circuito.

Observação: Pode verificar-se que a característica em curto-circuito é uma reta devido a estar na região não saturada.

As duas curvas podem ser desenhadas para se obter

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Fig 4.4.a) Curvas e características para determinação de parâmetros da M.S. | Fig 4.4.b) Medida da reatância síncrona. |

Para uma corrente de campo *If* o módulo da impedância síncrona, pode ser calculada por:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2) |

ou

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.3) |

A reatância síncrona pode ser calculada a partir da impedância síncrona como:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.4) |

A resistência de armadura é pequena em relação a reatância síncrona (RA<<Xs) de tal maneira que quando está não é disponível, pode ser desprezada ficando: Xs ≈ |Zs|. Neste caso, as equações 4.2 e 4.3 podem ser usadas para determinar a reatância síncrona diretamente.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.5) |

Observar-se que para corrente If1 da Fig 4.4.b , a tensão a tensão é saturada, assim a reatância assim calculada é chamada de “Reatância síncrona saturada, XSS” ou seja:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.6) |

Também é possível obter a reatância síncrona não saturada usando a linha do entreferro como:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.5) |

Pode-se demonstrar que a reatância síncrona não satura sempre é a mesma usando relações de proporcionalidade do teorema de Thales.

Quanto mais saturada estiver a máquina menor será a reatância síncrona porque o incremento da corrente de armadura não é acompanhada proporcionalmente com o aumento da tensão de armadura.

Observação: Os ensaios em vazio e em curto-circuito são feitos nos terminais trifásicos da máquina. Portanto, as variáveis monitoradas sempre são VL e IL. Para obter EA e IA utilizadas nas equações acima deve ser considerada a ligação da máquina (estrela ou delta).

Em estrela: EA = VL/√3; IA = IL

Em delta : EA = VL ; IA = √3.IL

Finalmente, a resistência de armadura pode ser determinada pelo ensaio em corrente contínua (DC) como é mostrado a seguir.

1. Teste de corrente contínua (DC).

Com a máquina desligada (em repouso) aplica-se uma tensão de corrente contínua na armadura e mede-se a corrente de armadura. Neste caso, o único que limita a corrente de armadura é a resistência de armadura (que é muito pequena), portanto, deve-se aplicar um valor muito pequeno de tensão para não ultrapassar a corrente nominal da máquina. A resistência de armadura pode ser obtida como:

|  |
| --- |
|  |
| Fig 4.6. Ensaio em corrente contínua |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.6) |

Sendo Vφ,DC: Tensão de fase aplicada na máquina síncrona

IA,DC: Tensão de armadura registrada no ensaio em corrente contínua (DC)

Podem-se fazer várias medições sem ultrapassar a corrente nominal da máquina. Como a resistência de armadura é praticamente constante (considera-se que os efeitos de temperatura são desprezíveis), apenas duas leituras podem são suficientes. O valor de RA deve ser praticamente o mesmo.

Destaca-se que a resistência obtida pela equação 4.6 em corrente contínua é diferente à resistência real de trabalho da máquina (corrente alternada). A resistência de armadura real da máquina síncrona é um pouco maior ao determinado pelo ensaio em corrente contínua porque a área efetiva dos condutores dos enrolamentos em AC é menor comparado com a área efetiva em DC como mostra a figura 4.5 (efeito pele devido à freqüência das correntes em AC).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Fig 4.5.a: Área efetiva em DC  | Fig 4.5.b: Área efetiva em AC  |

1. Relação de curto-circuito (RCC)

Outro parâmetro que algumas vezes aparece nas folhas de especificações das máquinas síncronas é a relação de curto circuito (em inglês short-circuit ratio) que pode ser calculado a partir da curva de saturação em vazio e a características de curto circuito como mostra a Fig. 4.6.



Fig 4.6: Correntes de campo para determinar a relação de curto-circuito (RCC)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.7) |

Pode demonstrar-se que a partir da relação de curto-circuito é possível determinar a reatância síncrona satura a tensão nominal como:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.8) |

O valor em ohms da reatância síncrona saturada a tensão nominal é ser calculado como:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.8) |

A impedância base, Zbase, pode ser determinado a partir dos valores nominais monofásicos:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.9) |

Sendo:

Vφ,nom : Tensão nominal monofásica.

Sφ,nom : Potência aparente nominal monofásica.

Exemplo 1) Um gerador de 200KVA, 480V, 60Hz, ligado em Y, com corrente de campo nominal de 5A foi testado e foram obtidos os seguintes dados:

1. Tensão em circuito aberto = 540V
2. Corrente de curto-circuito = 300A
3. Quando foi aplicada tensão contínua de 10V nos terminais da máquina, foi obtido uma corrente de 25A.

Determine a resistência de armadura e a reatância síncrona.

**Dados:**

***If*** = 5A

VL,vazio = 540V (obtido da curva em saturação em vazio)

IL,CC = 300A(obtido da característica em curto-circuito)

VDC = 10V

IDC = 25A

**Resposta:**

Como o gerador está ligado em estrela para determinar os valores monofásicos: tem-se:

|  |  |
| --- | --- |
|  | EA = VL,vazio**/**√3 EA = 540**/**√3;EA = 311,8 V;IA,CC = IL,vazioIA,CC = 300A |

O módulo da impedância síncrona para a corrente de campo de 5A pode ser calculada como:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Zs=1,039Ω

Do ensaio em corrente contínua:

|  |  |
| --- | --- |
|  | VDC=10VIDC=25AComo está ligado em estrela:Vφ,DC=10/2Vφ,DC=5V;IA,CC=25ARA=5/25RA=0,2Ω |

De tal maneira que Xs≈|Zs|

Exemplo 2) Um gerador trifásico 45 KVA, tensão de linha de 220V, 6 pólos, 60Hz, ligado em Y, foi testado com um ensaio circuito aberto e ensaio curto-circuito e os valores de entreferro foram extrapolares. Os resultados foram:

**Ensaio em circuito aberto**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *If (A)* | 2,2 | 2,84 |
| VL,vazio(V) | 202 | 220 |
| VL,entreferro (V) | 202 | 260 |

**Ensaio em curto-circuito**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *If (A)* | 2,2 | 2,84 |
| IL,CC (A) | 118 | 152 |

1. Determine o valor não saturado da reatância síncrona
2. Determine a reatância síncrona saturada à tensão nominal
3. Determine a reatância síncrona saturada à tensão nominal em pu (por unidade).
4. Determine a relação de curto-circuito RCC
5. Verifique que Xss,pu =1/RCC

Solução:

O s valores dos ensaios serão transformados em valores por fase. Como a máquina está ligada em estrela, tem-se: 



1. (reatância síncrona não saturada)

|  |  |
| --- | --- |
|  | ΩTambém pode ser obtido para Ω |

1. , reatância síncrona saturada a tensão nominal. Deve-se usar a tensão da curva de saturação em vazio para uma corrente de If=2,84

|  |  |
| --- | --- |
|  | =0,835 Ω |

1. . Deve-se calcular a impedância base.



A partir dos valores nominais da máquina:



Como está ligado em estrela: Vφ,mon = VL,nom/√3 e Sφ,mon = S3φ,nom/3. Os valores nominais por fase são:

Vφ,nom : 127V

Sφ,nom : 15kVA







1. Relação de curto-circuito



 = corrente de campo para produzir a tensão nominal em circuito aberto.

corrente de campo para produzir a corrente nominal em curto circuito.

1. Verificar que XSS é igual a 1/RCC

Portanto Xss,pu =1/RCC

Próxima Aula: Diagrama de potência e operação do gerador síncrono em forma isolada.