

Relatório 01 - Ensaio em Vazio e em Curto-Circuito da Máquina Síncrona

Batista, H.O.B.¹, Alves, W. F. O.²

Matriculas: 96704¹, 96708²

Departamento de Engenharia Elétrica,

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

e-mails: hiago.batista@ufv.br¹, werikson.alves@ufv.br²

I. INTRODUÇÃO

A diferença entre a tensão gerada e a tensão nos terminais de um gerador síncrono é a queda de tensão interna na armadura (estator), Eq 1. Esta queda de tensão é devida a três fatores: a queda de tensão devido à perda Joule na resistência da armadura, a queda de tensão devida à reatância de dispersão, a queda de tensão devida ao efeito da saliência do rotor (apenas para a máquina de polos salientes) e a queda de tensão devida ao efeito de reação da armadura. Estas três quedas se resume como a queda de tensão na impedância síncrona.

$$E_F = V_T + R_a I_a + jX_s I_a \quad (1)$$

Para o estudo das características operacionais de uma máquina síncrona, como por exemplo, regulação de tensão, perdas e rendimento, são feitos os ensaios a vazio e de curto-circuito, que possibilitam a determinação da reatância síncrona e da resistência efetiva, por fase. Estes ensaios permitem o levantamento das curvas da máquina que são as curvas: a curva de magnetização em vazio (ensaio em vazio) e a curva de curto-circuito (ensaio de curto-circuito) que possibilitarão, além da obtenção de alguns parâmetros que caracterizam os efeitos que se manifestam no funcionamento do gerador, ajudam na especificação de alguns equipamentos adicionais necessários na complementação do sistema que irá funcionar junto ao gerador.

A. Determinação da Resistência Efetiva por Fase

A resistência efetiva por fase pode ser obtida a partir do ensaio em corrente contínua conforme a Figura 1. Este ensaio é o preferido porque elimina as perdas por acoplamento magnético na estrutura polar e no ferro existentes quando a alimentação é em tensão alternada. Neste método aplica-se tensão contínua no estator do gerador até circular a sua corrente nominal. Conforme a Figura 1, para as bobinas ligadas em estrela, a resistência CC por fase é dada pela Eq 2. A resistência CA por fase foi obtida multiplicando-se a resistência CC por um fator de 1,5, que depende de vários fatores, tais como, frequência, qualidade do isolamento, potência da máquina, dentre outros, portanto, $R_{CA} = 1,5 R_{CC}$. A Figura 1 mostra

o esquema de ligação do alternador para a obtenção da resistência efetiva por fase.

$$R_{CC} = \frac{\text{Leiturado voltmetro}}{2 \cdot \text{Leiturado Ampermetro}} \quad (2)$$

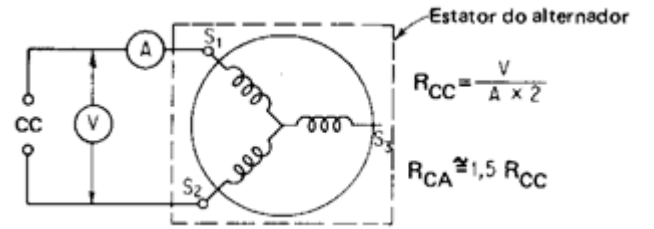


Figura 1. Esquema de ligação para a determinação da resistência efetiva por fase do estator do alternador.

B. Ensaio em Vazio

Do ensaio em vazio obtém-se a curva $E_F = f(I_F)$. Esta curva é obtida excitando gradualmente o circuito de campo a partir de uma corrente nula e medindo-se a tensão gerada no estator. O gerador é acionado na sua velocidade nominal constante. Um amperímetro CC é ligado no circuito de campo, para que se leia a corrente de campo, e um voltímetro CA é ligado a quaisquer dois terminais do estator, para medir a tensão de linha. As leituras são feitas a partir de um valor nulo para a corrente de campo até um certo valor da corrente de campo onde a máquina entra na região de saturação. Em cada caso são feitas medições da corrente de campo e da tensão gerada, obtendo-se a curva normal de magnetização do gerador. Para o gerador trifásico as grandezas elétricas devem ser em valores por fase. Durante o ensaio a velocidade deve ser mantida constante e igual a nominal. Caso contrário, a tensão gerada deve sofrer correção, conforme a Eq 3, na qual W é velocidade do rotor em RPM, E_F é a tensão gerada para a rotação W e E'_F é a tensão gerada para rotação W'. A Figura 2 mostra o esquema de ligação do gerador para a obtenção da sua curva normal de magnetização.

$$E_F = E'_F \frac{W}{W'} \quad (3)$$

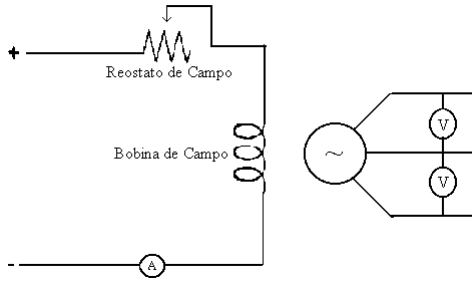


Figura 2. Esquema para realização do ensaio a vazio

C. Ensaio em curto circuito

O ensaio em curto-circuito é feito acionando o gerador na sua velocidade nominal e curto-circuitando os terminais do estator. A corrente de excitação do circuito de campo é ajustada a partir de zero e é variada gradativamente. Para cada variação tem-se $I_{CC} = f(I_F)$, onde se obtém uma curva linear. É fácil de imaginar que estando a máquina na condição de curto-circuito, uma pequena tensão gerada é suficiente para circular uma grande corrente ($I_A = E_F/Z_S$). Assim sendo, inicia-se com $I_F = 0$ e aumenta-se lentamente o seu valor até que a corrente que circula pelo estator assuma valores dentro da faixa permissível. A figura 3 mostra o esquema de ligação do gerador para a obtenção da curva de $I_{CC} = f(I_F)$.

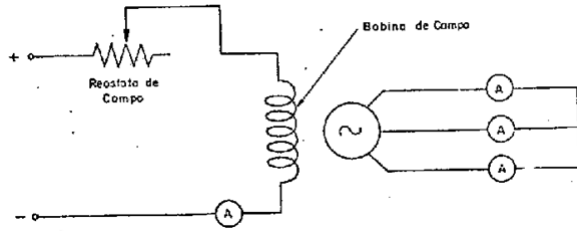


Figura 3. Esquema de ligação do ensaio de curto-circuito

D. Relação de Curto-Circuito

É a relação entre a corrente do enrolamento de campo necessária para gerar a tensão terminal em vazio e a corrente do enrolamento de campo necessária para fazer circular a corrente nominal na armadura com os terminais da armadura em curto-circuito, sendo dada pela Eq 4, onde I_F é a corrente do enrolamento de campo que gera a tensão terminal nominal em vazio e I_{F1} é a corrente do enrolamento de campo que faz circular a corrente nominal na armadura com os seus terminais em curto-circuito. A relação de curto-circuito possui dois casos sendo eles quando $r > 1$ ou $r < 1$ informando se o gerador tem uma menor ou maior regulação.

$$r = \frac{I_F}{I_{F1}} \quad (4)$$

II. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Este relatório tem por objetivo a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente da máquina síncrona, da relação de curto-circuito e das perdas mecânicas (atrito e ventilação), perdas no ferro e as perdas Joule nos enrolamentos da armadura. Também são levantadas as curvas características em vazio e de curto-circuito, e a relação de curto-circuito.

III. MATERIAIS

- Uma máquina síncrona trifásica;
- Um motor de corrente contínua para acionar o eixo do gerador, com excitação independente;
- Três fontes de tensão contínua, respectivamente, de 220 V/0,6 A e 220V /10 ;
- Um tacômetro;
- Seis multímetros;
- Dois varivolts;

IV. DESENVOLVIMENTO

No ensaio de curto-circuito quando a corrente de curto-circuito da armadura, por fase, for igual à corrente nominal do gerador, estando o mesmo na sua velocidade nominal, se o curto circuito fosse aberto, mantendo a corrente de excitação constante, a tensão gerada por fase pode ser medida nos terminais do estator. A utilização das curvas permite a obtenção desta tensão. A Figura 4 mostra a forma de obter a tensão gerada por fase do gerador.

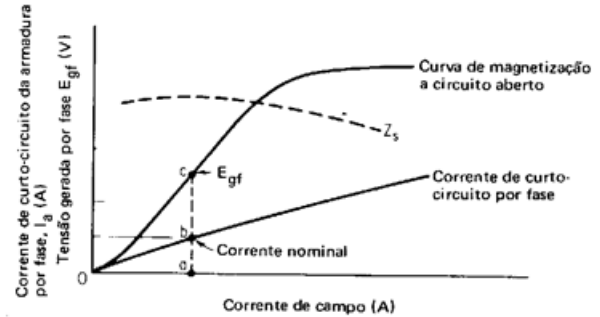


Figura 4. Características a vazio e de curto-circuito de um gerador síncrono

Na Figura 4 o ponto 0b representa a corrente de curto-circuito correspondente a corrente nominal do gerador, para uma corrente de excitação I_F constante. O prolongamento desta corrente na curva normal de magnetização dá a tensão gerada a vazio.

Do ensaio de curto-circuito como a tensão nos terminais do gerador é zero, da Eq 1, obtém-se Z_S , onde $Z_S = R_a I_a + jX_S I_a$. Como $R_{CA} = 1,5R_{CC}$ e R_{CA} é o próprio R_a , do triângulo de impedâncias obtém-se X_S .

Portanto, inicialmente, foram coletados os dados de placa, apresentados na Tabela I e foram observados os enrolamentos do estator e rotor da máquina, dessa forma, verificando o tipo de ligação das bobinas do estator.

Tabela I
DADOS DA MÁQUINA SÍNCRONA.

Potência Aparente	2 kVA
Potência Ativa	1,6 kW
Tensão (V_T)	220/133 V
Corrente (I_A)	5/9 A
FP	0,8 Indutivo
Velocidade	1800 RPM
Tensão (E_f)	220 V
Corrente (I_f)	0,6 A
Rotor	Polos Salientes
Ligação	Estrela

Depois, foi acionado a máquina síncrona pelo motor de corrente contínua na sua velocidade nominal, ligando o motor de corrente contínua com excitação independente. Em seguida, ligou-se os instrumentos de medição nos enrolamentos de campo e de estator da máquina síncrona conforme mostrados nas Figura 2 e vario-se a corrente no enrolamento de campo da máquina síncrona foram efetuadas as leituras. Depois, repetindo os mesmos passos, foi feita as leituras para o ensaio de curto, conforme a Figura 3.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Montar uma tabela de $I_{CC} = f(I_f)$

Tabela II
 I_{cc} EM FUNÇÃO DE I_f .

I_f	I_{cc}
0.00	0.11
0.01	0.41
0.03	0.62
0.04	0.84
0.05	0.98
0.08	1.45
0.10	1.73
0.15	2.60
0.21	3.47
0.25	4.13
0.30	4.85
0.35	5.68

B. Traçar os gráficos de $E_F = f(I_f)$ e $I_{CC} = f(I_f)$ e Traçar a linha do entreferro e a linha do entreferro modificada

Tendo realizado as leituras dos ensaios a vazio (curva em vermelho) e em curto-circuito (curva em azul) ambos são mostrados na Figura 5 a qual ilustra as curvas de $E_F = f(I_f)$ e $I_{CC} = f(I_f)$.

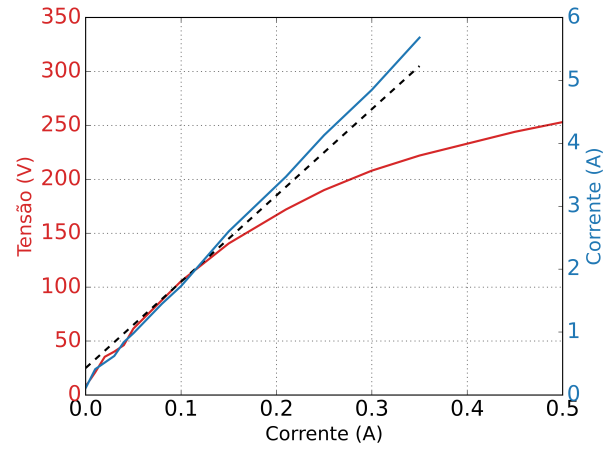


Figura 5. $E_F = f(I_f)$ e $I_{CC} = f(I_f)$

C. A partir dos gráficos e dos dados de placa da máquina síncrona obter os valores da reatância síncrona saturada e não saturada, em ohms e em p.u.

De acordo com a figura 5, sabemos que a Reatância não saturada é:

$$X_{ns} = \frac{230}{4.13\sqrt{3}} = 32,15\Omega \quad (5)$$

Sabemos que a relação de curto circuito é o inverso da reatância saturada em p.u, então:

$$R_{CC}^{-1} = X_S = \frac{0.3}{0.4} = 75\%p.u \quad (6)$$

Como $Z_{base} = \frac{220^2}{2000} = 24,20 \Omega \rightarrow X_S = 24,20 \cdot 75\% = 18,15 \Omega$.

D. A resistência da armadura é medida pelo método da corrente contínua

Portanto, usando a Eq.2, temos:

$$R_{CC} = \frac{\text{Leiturado voltmetro}}{2 \cdot \text{Leiturado Ampermetro}} = \frac{12}{2 \cdot 5} = 1,2 A$$

$$R_A = R_{CA} = 1,5 \cdot R_{CC} = 1,8\Omega$$

E. Determinar a corrente de campo necessária para o gerador fornecer a sua tensão nominal na sua potência para uma carga com fator de potência de 0,8 atrasado

A corrente de armadura pode ser obtida a partir de:

$$I_A = \frac{S}{E_f} < -\cos(0,8) = 5,25 < -36,87$$

Aplicando os dados na Eq.1, temos:

$$E_A = \frac{220}{\sqrt{3}} + (5,25 < -36,87)(1,8 + 18,15j) = 209,73 < 19,56$$

Portanto, analisando o gráfico, determinamos que a corrente de campo é, aproximadamente, 0,22 A.

F. Determinar a relação de curto circuito para este gerador e verificar se a sua regulação de tensão é boa ou ruim, bem como seu nível de curto-circuito

Como dito anteriormente, a relação de curto circuito é dada pelo inverso da reatância saturada, logo:

$$r_{cc} = \frac{0,4}{0,3} \approx 1,33$$

Portanto, como $r > 1$, temos que a regulação é menor, com reatância da armadura mais baixa, portanto menor capacidade para limitação do nível da corrente de curto-circuito.

G. Determinar a regulação de tensão para a carga do item E

$$Reg = \frac{|E_f| - |V_T|}{|V_T|} = \frac{209,73 - 127,02}{127,02} = 0,65 \rightarrow Reg = 65\%$$

H. Através dos gráficos determinar a tensão gerada a vazio

Para uma corrente de campo de 0,4 A temos que a tensão a vazio será a tensão nominal.

I. Porque o gerador deve operar com uma frequência rigorosamente constante

Para haver que possa haver sincronismo do Sistema Interligado Nacional (SIN).

J. Quando é que se utiliza geradores de pólos salientes e de pólos lisos e como diferenciá-los

Utiliza-se geradores de polos salientes, em sistemas que necessitam de baixa velocidade, como as usinas hidrelétricas. E no caso de polos lisos são em sistemas em que o rotor gira a altas velocidades, como em turbinas a gás e a vapor de usinas termelétricas. Podemos diferenciar esses geradores através do número de polos e pela rotação do rotor.

K. Porque o gráfico de $I_{CC} = f(I_F)$ é uma linha reta, ou seja, não ocorre a saturação

Durante o ensaio de curto-circuito, $V_T = 0$ e Z_S é constante, logo ao aumentar a corrente de campo, a corrente de armadura também aumenta proporcionalmente, tornando assim uma linha reta. Dessa forma, o limite dela seria o próprio limite de corrente de campo, não havendo saturação de I_{CC} .

VI. CONCLUSÕES

Por meio deste relatório, foi possível observar o funcionamento básico de uma máquina síncrona, como se determina os parâmetros e o impacto de uma carga atrasada nos valores iniciais e algumas curiosidades sobre as máquinas de polos saliente e não salientes.

REFERÊNCIAS

- [1] Stephen J Chapman. *Fundamentos de máquinas elétricas*. AMGH editora, 2013.
- [2] J. T. Resende. *Laboratório de Máquinas Elétricas 2 - Prática 01*. D.E.L.-UFV, 2022.
- [3] Stephen D Umans. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7*. AMGH Editora, 2014.